REG. MED. EDIN.
COLL.

x. Hbio. 39

R38405

Digitized by the Internet Archive
in 2015

https://archive.org/details/b21717370

Die mechanische Bedeutung

der

Schienbeinform.

Mit besonderer Berücksichtigung

der

Platyknemie.

Ein Beitrag zur Begründung des Gesetzes der funktionellen Knochengestalt

von

Dr. Hugo Hieronymus Hirsch.

Mit einem Vorwort von Prof. Dr. Rudolf Virchow.

Mit 24 den Text gedruckten Figuren und 3 lithographirten Tafeln.

ROYAL COLLEGE OF PHYSICIANS EDINR. LIBRARY.

Berlin.

Verlag von Julius Springer.

1895.

Buchdruckerei von Gustav Schade (Otto Francke) in Berlin N.

Bei Untersuchungen über die Vorzüge der neuen Bier-schen osteoplastischen Amputationsmethode — gelegentlich dort angestellter Betrachtungen über die Bedeutung der spitzen Atrophie von amputirten Knochenstümpfen — fand ich Veranlassung, mich mit der Frage von den Beziehungen zwischen Form und Funktion der Knochen zu beschäftigen. Da ich einander sehr widersprechende Ansichten antraf, versuchte ich durch eigene Untersuchungen der Lösung dieser praktisch wie theoretisch wohl gleich wichtigen Frage näher zu kommen. Die bisherigen Forschungen beziehen sich im Wesentlichen lediglich auf die funktionelle Architektur der Spongiosa. Die vorliegende Arbeit behandelt, in ihrem Hauptabschnitte, die äussere Form und die innere Struktur eines aus kompakter Knochensubstanz bestehenden Skeletstückes: es werden die Querschnittsformen des Schienbeinschaftes auf ihre Bedeutung geprüft.

Herr Geheimer Medicinalrath Prof. Dr. Rudolf Virchow, der mir schon vorher besonderes Entgegenkommen bewiesen hatte, besass die grosse Güte, diese Schrift vor der Drucklegung durchzusehen und ihr ein Vorwort mit auf den Weg zu geben. Der neue Beweis seines fördernden Wohlwollens verpflichtet mich, ihm auch an dieser Stelle meinen aufrichtigsten Dank auszusprechen. Seine Kritik giebt mir Anregung zu weiterer Arbeit.

Charlottenburg, den 1. September 1895.

Dr. Hugo Hieronymus Hirsch.

Die Arbeit des Herrn H. H. Hirsch hat ein scheinbar sehr einfaches Problem zum Gegenstand. Er formulirt dasselbe folgendermaassen (S. 5):

Ist die Gestalt der Knochen ausschliesslich von funktionellen mechanischen Einflüssen abhängig, so dass man sie schlechtweg als funktionelle bezeichnen kann, oder wird dieselbe durch nicht-funktionelle Einflüsse, durch Druckwirkungen der anliegenden Weichtheile mitbestimmt?

Aber der Verf. findet selbst sehr bald, dass diese Fragestellung die in Betracht kommenden Möglichkeiten nicht erschöpft. So wird er durch Zschokke darauf aufmerksam, dass auch das Moment der Vererbung zu berücksichtigen sei. Er erkennt die Bedeutung dieses Momentes an, lässt dasselbe aber nicht weiter hervortreten, da seiner Ansicht nach die Vererbung nur „gleichsam in groben Zügen die Umrisse des Skeletes bestimmt". Aber auch wenn man dies zugestehen wollte, würden seine Ausführungen an Klarheit gewonnen haben, wenn er schon die Hauptfrage im Hinblick auf die Erblichkeit anders formulirt hätte.

Das Ergebniss seiner Untersuchungen ist in Kürze, dass die mechanischen Einflüsse, welche auf die Knochen einwirken, zweierlei Art sind: funktionelle und nicht-funktionelle. Zu den ersteren rechnet er die an den beiden Gelenkflächen angreifenden Druckkräfte und die von den Ansatzpunkten der Muskeln und Bänder aus einwirkenden Zugkräfte: sie verändern die Gestalt des Knochens. Die nicht-funktionellen, z. B. der Druck anliegender Weichtheile, thun dies nicht. Der Beweisführung für diesen Satz ist der erste Theil der Schrift gewidmet.

Der zweite Theil beschäftigt sich im Einzelnen mit der funktionellen Gestalt des Schienbeines unter Berücksichtigung der Biegungsfähigkeit desselben, welche durch besondere Versuche geprüft wurde. Der Leser wird gerade an diesem Abschnitte sich ein Urtheil bilden können über die strengen Ansprüche, welche der Verf. an seine Arbeitsleistung gestellt, und über die Sorgfalt, mit welcher er die Untersuchungen ausgeführt hat. Es wird dies die Stelle sein, wo auch die Nachuntersuchungen anzusetzen haben. Die Arbeit des Verf. kann begreiflicher Weise nicht als eine abschliessende betrachtet werden. Für einzelne Fälle von individuellen Verschiedenheiten der Schienbeinformen, wie sie im IV. Abschnitt behandelt werden, können wohl plausible Erklärungen gegeben werden, aber für eine allgemeine Theorie derselben wird ein viel mehr in das Einzelne gehendes Studium sowohl der genetischen wie der finalen Vorgänge an der Tibia nöthig sein, ehe ein sicheres Schlussurtheil gewonnen ist.

Das zeigt sich recht deutlich in dem Abschnitt über Platyknemie, welche der Verf. mit ebenso grosser Vorliebe, als Gelehrsamkeit behandelt. Der Gang der Untersuchung wurde bei ihm, wie bei der Mehrzahl seiner Vorgänger, hier ein geradezu umgekehrter von dem, was in Wirklichkeit zu beobachten ist. Während aus der Kenntniss von den Sitten und Gebräuchen der lebenden Menschen eine Erklärung gewonnen werden sollte für die abweichende Gestalt der Tibia, so kommt der Verfasser vielmehr dahin, aus dem Verhalten der Tibia Rückschlüsse auf die Sitten und Gebräuche von Völkern zu machen, von denen wir sonst eigentlich nichts wissen, z. B. von Neolithikern. Ref. vermag das nicht geradezu zu tadeln, da er selbst es ebenso gemacht hat; der Unterschied von dem Verf. liegt nur darin, dass dieser die Untersuchung für abgeschlossen hält, während dieselbe in Wahrheit nur eine genauere Fragestellung ermöglicht.

Wie man aber auch über den Werth der einzelnen Abschnitte der Schrift urtheilen mag, das Verdienst wird nie-

mand dem Verf. bestreiten können, dass er seiner Aufgabe mit einem grösseren Maass positiver Arbeit nachgegangen ist und eine ungleich grössere Zahl exakter Bestimmungen gemacht hat, als einer seiner Vorgänger. Auch dürfte ihm wohl allgemein zugestanden werden, dass die Frage nach der Formung der Knochen durch funktionelle Kräfte durch seine Arbeit um ein gutes Stück vorwärtsgebracht worden ist. Gleichviel ob er selbst sie noch weiter verfolgt oder ob ein Anderer versucht, sie weiter zu führen, sie wird sicher nicht liegen bleiben. Denn ihre Bedeutung erstreckt sich weit über das begrenzte Gebiet hinaus, innerhalb dessen die Tibia ihre Entwicklung macht.

Wyk auf Föhr, am 25. August 1895.

Rudolf Virchow.

Inhalt.

Einleitung. Seite

1. Die verschiedenen früheren Deutungen der Knochenformen . . . 1
2. Die beiden, gegenwärtig einander gegenüberstehenden Auffassungen 3
3. Erläuterung des Begriffs „funktionelle Knochengestalt“ 5
4. Die Entstehung der funktionellen Knochengestalt durch die allgemeine biologische Eigenschaft der Anpassungsfähigkeit 6
5. Die funktionellen mechanischen Einwirkungen und die nichtfunktionellen 7
6. Bestimmung des Begriffes „Gesetz der funktionellen Knochengestalt“ 8
7. Die beiden verschiedenen Richtungen des Einflusses der funktionellen Einwirkungen 8
8. Das Zusammenwirken von Anpassungs- und Vererbungsvorgängen bei der Entstehung der Knochenformen 9

Erster Theil.

Der vermeintliche Einfluss von Druckwirkungen der anliegenden Weichtheile auf die Form der Knochen.

Unmittelbares Moment der Widerlegung:

1. Die mechanische Unmöglichkeit des Stattfindens der vermeintlichen Druckwirkungen 11

Mittelbare Momente der Widerlegung:

2. Die pathologische Erfahrung der Druckusuren der Knochen . . 14
   a) Die Bedingungen der Schädlichkeit des eine Usurirung des Knochens bewirkenden Druckes 15
   b) Die physiologische Verschiedenheit von schwachen und starken Druckwirkungen gegenüber dem Knochengewebe . . . 19
3. Die pathologische Erfahrung der Druckatrophien der quergestreiften Muskeln 23
4. Zurückführung der Rinnen und Furchen in der Knochenoberfläche auf seitlich angreifende Zugkräfte 23

Seite

5. Die physiologische Bedeutung der Sesambeine 26
6. Ein physiologisch verschiedenes Verhalten der glatten und der quergestreiften Muskeln 29

Schlusserörterung:

7. Die physikalische und biologische Unerklärlichkeit einer Beeinflussung der Knochen durch Druckwirkungen seitens weicher Gebilde 30

Zweiter Theil.

Die funktionelle Gestalt des Schienbeines . . 32

I. Analyse der mechanischen Beanspruchung des Schienbeines . . 33

Besondere Untersuchung der Beanspruchung

1. beim Stehen auf einem, im Knie gestreckten Beine (hierzu die Tafel I) 35
2. beim Stehen auf einem, im Knie gebeugten Beine (hierzu die Tafel II) 39
3. beim Stehen auf beiden, im Knie gestreckten Beinen (hierzu die Tafel III) 42
4. Berücksichtigung der rhachitischen Schienbeinverkrümmungen 48

II. Einige Grundbegriffe aus der Lehre von der Biegungsfestigkeit . 50

1. Das Widerstandsmoment 50
2. Querschnitte von gleicher Festigkeit 54
3. Körper von gleicher Biegungsfestigkeit 56

III. Erklärung der allgemeinen Formeigenthümlichkeiten des Schienbeines 57

1. Der mechanische Sinn der Dreiecksform des Querschnittes . 60
2. Der mechanische Sinn des proximalwärts erfolgenden Wachsthums des Tiefendurchmessers 63

IIIA. Prüfung von Schienbeinen auf Biegungsfestigkeit 66

1. Anordnung der Versuche 67
2. Tabelle der Versuche und ihrer Ergebnisse 72
3. Besprechung der Ergebnisse 76

Fortsetzung von Abschnitt III 84

Bedeutung des Ergebnisses der angestellten Festigkeitsversuche für die Erklärung der Dreiecksform des Schienbeinquerschnittes 84

IV. Zur Erklärung der individuellen Verschiedenheiten der Schienbeinformen 86

1. Ueber individuelle Verschiedenheiten der Beanspruchung . 86
2. Die kindliche Schienbeinform 87

Seite

IV A. Die Platyknemie 90

1. Ueber die Besonderheit des platyknemischen Schienbeines und seine Verbreitung 90
2. Die früheren Erklärungsversuche der Platyknemie . . . 95
3. Erklärung der Platyknemie durch das Gesetz der funktionellen Knochengestalt 103
   a) Das anatomische Verhältniss des gewöhnlichen und des platyknemischen Schienbeintypus zu einander . . . 103
   b) Der Unterschied zwischen den beiden Schienbeintypen bezüglich ihrer mechanischen Leistungsfähigkeit . . . 112
   c) Die entsprechende aussergewöhnliche Beanspruchung der Schienbeine bei den platyknemischen Individuen . 114
   d) Bestätigung der theoretisch hergeleiteten Erklärung der Platyknemie durch die Thatsachen der Erfahrung 115

Schlusserörterung.

Eine wichtige Beziehung zwischen der äusseren Form und der inneren Struktur der Schienbeinquerschnitte 120

Anhang.

Erklärung der spitzen Atrophie der Knochenstümpfe amputirter Gliedmaassen durch das Gesetz der funktionellen Knochengestalt 123

Schluss.

1. Die Nothwendigkeit einer physiologischen Mechanik 126
2. Erklärung der Entstehung der Knochenformen durch biologische Gesetze, Erklärung der funktionellen Bedeutung derselben durch Gesetze der Physik und Mechanik 127

Tafel-Erklärung 129

„Es unterliegt keinem Zweifel mehr, dass wir die Knochenformen um so besser werden begreifen lernen, je weiter wir in der Anwendung mechanischer Gesetze auf ihre Erklärung vorgehen."

Rauber (1876).

Einleitung.

Die Auffassung der Knochenformen hat in verhältnissmässig kurzer Zeit grosse Wandlungen durchgemacht. Bis etwa zur Mitte dieses Jahrhunderts hat man wohl fast allgemein mit Blumenbach[1]) die Entstehung der Knochenformen einfach auf die Wirksamkeit eines den Organismen innewohnenden Bildungstriebes, eines „nisus formativus", zurückgeführt. Die moderne Naturwissenschaft, für welche die Einheit von Kraft und Stoff ein Grundaxiom geworden ist, konnte sich mit einer solchen Erklärung nicht mehr begnügen. So weist denn L. Fick[2]), in den fünfziger Jahren, den „Dämon Bildungstrieb" energisch zurück und versucht eine andere Erklärung. Diese geht dahin, die Knochenformen entständen auf rein mechanische Weise durch Druckwirkungen der umgebenden Weichtheile; insbesondere seien es die anliegenden Muskeln, welche, bei ihrem Wachsthum und bei ihrer Thätigkeit einen Druck gegen den Knochen ausübend, dessen Form geradezu zurechtprägten. Dazu bemerkt Virchow[3]), dass neben dem Druck sicherlich auch der Muskelzug als ein formbestimmendes Moment anzusehen sei. Jedermann wisse ja, wie es Bichat schon in den dreissiger Jahren erwähne, dass den sehnigen Ansätzen der Muskeln regelmässig Knochenvorsprünge entsprächen, und dass diese um

[1]) Joh. Friedr. Blumenbach, Institutiones physiologiae Goettingae. 1787.

[2]) L. Fick, Ueber die Ursachen der Knochenformen. Göttingen, 1857.

[3]) R. Virchow, Knochenwachsthum und Schädelformen. Sein Archiv, 1858, Bd. XIII, S. 329.

so grösser würden, je kräftiger der Muskel wirke und sich ausbilde.

Auf einen völlig neuen Gesichtspunkt für die Beurtheilung der Knochenformen lenkt dann H. von Meyer[1]) die Aufmerksamkeit durch die Entdeckung der wohlgeordneten und wohlmotivirten Architektur in der spongiösen Knochensubstanz. In seiner bekannten Veröffentlichung theilt er mit, das Gefüge der Spongiosa lasse bestimmte Plättchensysteme erkennen, und diese stellten — worauf ihn selbst der Mathematiker und Ingenieur Culmann, der Begründer der graphischen Statik, aufmerksam gemacht habe — durch ihren Verlauf die gleichen Linien dar, welche die graphische Statik als Spannungstrajektorien, d. i. als Kurven des maximalen Druckes und des maximalen Zuges festgestellt habe. Des Weiteren führt von Meyer aus, dass bei jugendlichen Individuen ebenso wie bei erwachsenen die spongiösen Knochentheile die den jeweiligen statischen Verhältnissen entsprechende Struktur besitzen. Es müsste daher im Innern des wachsenden Knochens, entsprechend den sich ändernden Beanspruchungsverhältnissen, eine Metamorphose der Spongiosaarchitektur vor sich gehen; es sei daher auch zu vermuthen, dass in Fällen pathologischer Formveränderung, z. B. bei rhachitischen Verkrümmungen, eine den veränderten Belastungsverhältnissen entsprechende, abweichende Spongiosastruktur zur Ausbildung gelange.

Diese Vermuthung ist bekanntlich schon bald nachher durch J. Wolff[2]) als richtig nachgewiesen worden, wie denn überhaupt jene Meyer'sche Veröffentlichung eine grosse Zahl von Forschern zu Studien über die Spongiosastrukturen normaler und pathologischer Knochen, der Knochen des Menschen und derjenigen verschiedener anderer Organismen, angeregt hat. Ausser Wolff sind dies Wolfermann[3]), Zajer[4]), Aeby[5]), Merkel[6]), Langer-

[1]) H. v. Meyer, Die Architektur der Spongiosa. Reichert's und du Bois-Reymond's Archiv, 1867.

[2]) J. Wolff, Ueber die innere Architektur der Knochen etc. Virchow's Archiv, Bd. 50, 1870.

[3]) H. Wolfermann, Beitrag zur Kenntniss der Architektur der Knochen. Reichert's und du Bois-Reymond's Archiv, 1872.

[4]) T. Zajer, Sur l'Architecture des os de l'homme, 1873.

[5]) Chr. Aeby, Zur Archit. der Spong. Centralbl. f. d. med. Wiss. 1873.

[6]) Fr. Merkel, Betrachtungen über das Os femoris. Virchow's Archiv, Bd. 59, 1874.

hans[1]), Bardeleben[2]), Roux[3]), Rasumowsky[4]), Nikoldani[5]), Eichbaum[6]), Zschokke[7]) und A. — Roux[8]) hat auch bei einem bindegewebigen Organe sehr komplicirter Struktur Untersuchungen in ähnlichem Sinne mit schönem Erfolge angestellt. — So ist es denn längst als eine sicher bewiesene Thatsache anzusehen, dass die Spongiosa in ihrer Struktur der vorliegenden mechanischen Beanspruchung überall in der zweckmässigsten Weise angepasst ist, beziehungsweise sich anpasst.

Mit Rücksicht auf den ursächlichen Zusammenhang, welcher nach dieser Erfahrung bezüglich der Spongiosastrukturen zwischen der Form der Knochen und ihrer Funktion besteht, beginnen nun auch schon bald nach der Veröffentlichung v. Meyer's Ansichten laut zu werden, gemäss welchen die L. Fick'sche Vorstellung von Grund aus irrthümlich sein, und die äussere Form der Knochen ebensowohl wie die innere Struktur in Abhängigkeit von der mechanischen Inanspruchnahme, von der Funktion der Knochen stehen soll. In diesem Sinne entwickelt Rauber[9]) eine „Theorie des Knochengerüstes". Insbesondere das Extremitätenskelet stellt nach ihm eine Gruppe von Gegenresultirenden vor, deren Komponenten die antagonistischen Muskelkräfte seien. Aehnlich giebt J. Wolff, wie er es wiederholt bei früheren Gelegenheiten und auch schon vor Rauber gethan hat, so neuerdings in einem grösseren Werke, worin er die Ergebnisse seiner früheren Arbeiten auf diesem Gebiete zusammenfasst, seiner Ansicht dahin Ausdruck, die Gestalt eines Knochens sei lediglich

[1]) P. Langerhans, Beiträge zur Archit. d. Spong. Virchow's Archiv, Bd. 61, 1874.

[2]) K. Bardeleben, Beiträge zur Anatomie der Wirbelsäule. Jena, 1874.

[3]) W. Roux, Beschreibung und Erläuterung einer knöchernen Kniegelenksankylose. Archiv f. Anat. und Physiol. 1885, Anat. Th.

[4]) W. Rasumowsky, Beitrag zur Architektonik des Fussskelets. Internat. Monatsschr. f. Anat. u. Physiol., 1889.

[5]) C. Nikoldani, Die Arch. d. skoliotischen Wirbels. Denkschrift der K. Akademie d. Wiss., Wien, 1889.

[6]) Eichbaum, Beiträge zur Statik u. Mechanik des Pferdeskelets. Festschrift, Giessen, 1890.

[7]) E. Zschokke, Untersuchungen über das Verhältniss der Knochenbildung zur Statik und Mechanik des Vertebratenskelets. Zürich, 1892.

[8]) W. Roux, Struktur der Schwanzflosse des Delphin. Archiv. f. Anat. u. Physiol. 1883, Anat. Abth.

[9]) A. A. Rauber, Elasticität und Festigkeit der Knochen. Leipzig, 1876, Th. I.

abhängig von seiner Funktion, — etwas Anderes, namentlich der vermeintliche Druck der anliegenden Weichtheile, komme als formbestimmendes Moment nicht in Betracht[1]).

Aber wenn auch Wolff mit aller Bestimmtheit diese letzte Behauptung ausspricht, so hat er es doch unterlassen, die als irrthümlich erachtete Vorstellung unmittelbar zu widerlegen. Daher kann man sich nicht darüber wundern, dass Roux[2]), in einer kritischen Besprechung eben jener Wolff'schen Arbeit, das Entgegengesetzte behauptet, d. h. nach wie vor die Vorstellung von der Bedeutung des Druckes der Weichtheile aufrechterhält. Es sei nur bei wenigen Knochen, führt Roux dort aus, wie z. B. bei den Fuss- und den Handwurzelknochen, die Gestalt und Struktur rein der Ausdruck der specifischen Funktion; bei den meisten Knochen würden durch äussere, nicht funktionelle Einwirkungen erhebliche Abweichungen von dieser Gestalt und Struktur bewirkt. „Die Tibia hat z. B.", meint Roux, „keine rein funktionelle Gestalt, da sie statt des ihrer Funktion entsprechenden mehr elliptischen Querschnittes durch den Druck der anliegenden Muskeln einen dreieckigen Querschnitt erhalten hat."

Zschokke[3]) glaubt und verleiht damit einer wohl fast allgemein üblichen Ansicht Ausdruck, eine Beeinflussung der Knochenformen durch Druckwirkung von Weichtheilen werde unzweifelhaft durch „die bekannten Eindrücke" der Muskeln, Sehnen, Nerven und Gefässe bewiesen. Auch „die Druckatrophie der Knochen infolge von Geschwülsten, Aneurysmen u. s. w." erscheint diesem Autor geeignet, für die betreffende Anschauung zu sprechen. Sodann macht Zschokke[4]) ausser dem Druck der Weichtheile noch eine Reihe anderer Momente, z. B. das der Vererbung namhaft, welche neben der Funktion noch von Bedeutung für die Gestaltung der Knochenformen seien, oder vielleicht sein könnten.

Auch bezüglich des Begriffes „statische Inanspruchnahme" glaubt Zschokke — und J. Disse[5]) giebt ihm darin Recht —

---

[1]) J. Wolff, Das Gesetz der Transformation der Knochen. Berlin, 1892, S. 95.

[2]) W. Roux, Das Gesetz der Transformation der Knochen. Berliner klin. Wochenschrift, 1893, S. 511.

[3]) E. Zschokke, a. a. O., S. 48.

[4]) E. Zschokke, a. a. O., S. 4.

[5]) Merkel's u. Bonnet's Ergebnisse der Anatomie und Entwicklungsgeschichte, Bd. II, 1892, S. 116 ff.

den Wolff'schen Ausführungen widersprechen zu müssen. Wolff gebraucht die Ausdrücke „statische Inanspruchnahme“ und „Funktion“ als gleichwerthig. Dem gegenüber betont Zschokke, dass auch die dynamische Beanspruchung, wie sie bei den Bewegungen des Körpers die Knochen erführen, mindestens ebenso wichtig sei wie die statische Beanspruchung, welche bei ruhigem Stehen erfolge. — Ob die mechanische Beanspruchung der Knochen bei Bewegungen „statisch“ oder „dynamisch“ ist, dies mag ein Mechaniker entscheiden; jedenfalls hätte Wolff, da er für Mediciner, nicht für Mechaniker schrieb, den betreffenden Ausdruck näher erläutern dürfen. Jedoch erscheint mir die Annahme, dass nur die Beanspruchung bei ruhigem Stehen und nicht zugleich auch die offenbar viel stärkere, welche bei Bewegungen stattfindet, gemeint sein soll, von vornherein so ungereimt, dass ich diesen Sinn den Wolff'schen Worten nicht unterlegen kann, vielmehr glaube, dass Wolff unter statischer Inanspruchnahme die gesammte mechanische Beanspruchung begreift, welche ein Knochen, z. B. ein Schienbein, bei ruhigem Stehen und auch beim Gehen u. s. w. erfährt.

Wie mir also in diesem Punkte lediglich ein Missverständniss vorzuliegen scheint, so glaube ich auch andere Sonderansichten einzelner Autoren als von untergeordneter Bedeutung bezeichnen zu können. Auf jeden Fall erscheint es mir im Interesse der Klarheit durchaus gerathen, weiterhin allein die eine Hauptstreitfrage im Auge zu behalten:

> Ist die Gestalt der Knochen ausschliesslich von funktionellen mechanischen Einflüssen abhängig, so dass man sie schlechtweg als funktionell bezeichnen kann, oder wird dieselbe durch nichtfunktionelle Einflüsse, durch Druckwirkungen der anliegenden Weichtheile mitbestimmt?

Um in dieser Streitfrage mitdenken zu können, muss man sich über den Begriff funktionelle Knochengestalt völlig im Klaren sein, welchen Begriff ich deshalb noch einmal kurz erläutern möchte.

Das feste Knochengerüst dient dem im Uebrigen aus Weichgebilden bestehenden Körper als Stützapparat. Diese mechanische Funktion stellt bestimmte Anforderungen an seine Festigkeit. Die Festigkeit einer Konstruktion gegenüber bestimmten Beanspruchungen ist nach den Regeln der Mechanik abhängig

einmal von den physikalischen Eigenschaften, d. h. von der Art des betreffenden Materials, sodann von dessen Menge und Anordnung. Die Art des Materials bildet für das ganze Skelet einen konstanten Faktor. Daher hängt die verschiedene Leistungsfähigkeit der einzelnen Knochen ab von den beiden anderen Faktoren, von der Menge und der Anordnung der Knochensubstanz. Die Bedeutung der Menge der Substanz für die Grösse der Festigkeit eines Körpers leuchtet ohne Weiteres ein, dagegen ist der grosse Einfluss, welchen die Form des Körpers besitzt, ohne ein Studium der Lehren der Mechanik schwer oder gar nicht verständlich. Die Mechanik aber lehrt, dass mit der gleichen Menge Materials gegenüber bestimmten Beanspruchungen eine sehr verschieden grosse Widerstandsfähigkeit erzielt werden kann, je nach der Form, in welche das Material gebracht wird. Diejenige Form der Verwendung, bei welcher mit dem gegebenen Material die grösste Festigkeit erreicht wird, ist natürlich die zweckmässigste. Also lässt sich, umgekehrt, durch die zweckmässigste Anordnung eine bestimmte Leistungsfähigkeit mit der geringsten Menge Materials erreichen.

Solcherweise soll denn nun auch, nach der einen Auffassung, bei allen Knochen das gesammte Material, wie es für die spongiösen Theile sicher nachgewiesen ist, in so zweckmässiger Weise angeordnet sein, dass die Knochen bei möglichst geringer Substanzmenge gegenüber ihrer mechanischen Beanspruchung die erforderliche Festigkeit besitzen. In diesem Sinne spricht man jetzt von der mechanischen Bedeutung der Knochenformen, im Gegensatz zu L. Fick, welcher bei diesen Worten ja die vermeintliche Prägung der Knochen im Auge hat. Gegenüber bestimmten, an die Funktion der Knochen gestellten Anforderungen kann es aber nur eine zweckmässigste Anordnung des Materials geben: so wäre dann durch die Funktion die Form der Knochen bestimmt. In diesem Sinne spricht man mit Roux von der funktionellen Bedeutung der Knochformen, von der funktionellen Gestalt der Knochen.

Ueber die Art und Weise, wie man sich eine solche Beeinflussung der Knochenformen durch die Funktion zu erklären hat, hat wiederum schon Roux[1]) eingehende und interessante Erörterungen angestellt; hier dürfte daher eine Andeutung genügen.

Wenn in der Spongiosa immer die zweckmässigste Struktur

[1]) W. Roux, Biologisches Centralblatt, 1881, Bd. I, S. 248.

zur Ausbildung gelangt, so ist daraus zu schliessen, dass den Knochenzellen die Eigenschaft anhaftet, die Form des Knochens der Beanspruchung derselben in der vollkommensten Weise anzupassen. Die Anpassungsfähigkeit gegenüber funktionellen Reizen kennt man als eine allen lebendigen Zellen zukommende, als eine allgemeine biologische Eigenschaft. Die Beeinflussung der Knochenformen durch die Funktion vollzieht sich also durch Vermittlung dieser bekannten biologischen Eigenschaft, sie stellt einen specifisch biologischen Vorgang dar. — Wenn dagegen nichtfunktionelle Druckwirkungen die Knochensubstanz gleich einer leblosen Masse zurechtprägten, dann handelte es sich um einen rein mechanischen Vorgang.

An einem bestimmten Beispiele möchte ich noch erläutern, welche funktionelle mechanische Einflüsse zu berücksichtigen sind, und welcherlei mechanische Einflüsse daneben als nichtfunktionelle in Betracht kommen sollen. Ich wähle gleich denjenigen Knochen, welcher in der vorliegenden Arbeit bezüglich der Bedeutung seiner Formverhältnisse speciell untersucht werden soll, das Schienbein.

Ein solches wird an seiner proximalen Gelenkfläche durch das Gewicht des Körpers belastet; die distale Gelenkfläche empfängt einen entsprechenden Gegendruck von Seiten des Sprungbeines. Die inserirenden Muskeln und Bänder entwickeln je nach dem Grade ihrer Spannung verschieden starke Zugkräfte, deren Einwirkungen sich von den Angriffspunkten der betreffenden Züge durch den Knochen hindurch fortpflanzen. Diese an den beiden Gelenkflächen angreifenden Druckkräfte und die von den Ansatzpunkten der Muskeln und Bänder aus einwirkenden Zugkräfte sind die funktionellen mechanischen Einflüsse. — Nun ist das Schienbein zum Theil von Muskeln umhüllt. Die letzteren könnten bei ihrem Wachsthum oder bei ihrer Thätigkeit in seitlicher Richtung gegen den Knochen andrängen. Solche Druckwirkungen der anliegenden Weichtheile wären dann die nichtfunktionellen mechanischen Einflüsse.

Nach diesen Erwägungen dürfte es klar sein, von welcher grundsätzlichen Bedeutung die Entscheidung jener Streitfrage ist. Dreht diese sich doch darum, ob lediglich ein zweckdienliches Princip oder ob zugleich auch ein zweckwidriges Princip bei der Entstehung der Knochenformen wirksam sein soll, ob die leben-

digen Knochen durch physiologische mechanische Einwirkungen immer in ein und derselben Weise, oder in zweifach, gänzlich verschiedener Weise beeinflusst werden sollen.

Meiner Ansicht nach steht überhaupt das ganze Princip der funktionellen Knochengestalt auf dem Spiel: Wenn die Uebereinstimmung der Bälkchenzüge in der Spongiosa mit den Spannungstrajektorien der graphischen Statik eine Bedeutung besitzen soll, dann muss diese Erscheinung des zweckmässigsten Aufbaues eine gesetzmässige sein, d. h. sie muss ebenso, wie bezüglich der inneren Struktur auch bezüglich der äusseren Form der Knochen gegeben sein. Nur wenn die **gesammte** Knochengestalt eine funktionelle Bedeutung besitzt, nur wenn **lediglich** die funktionellen mechanischen Einflüsse die Gestaltung der Knochen bestimmen, kann von einem **Gesetz** der funktionellen Knochengestalt die Rede sein.

Nimmt man nun aber einen derartig durchgreifenden Zusammenhang zwischen der Form der Knochen und ihrer Funktion an, so muss man dann auch sofort, wie ich[1]) dies schon in einer früheren Arbeit klarzulegen mich bemüht habe, zwei verschiedene Richtungen scharf auseinanderhalten, in welchen eine Beeinflussung der Form durch die Funktion stattzufinden hat, nämlich eine quantitative und eine qualitative.

1. Die Grösse der einwirkenden Kräfte bestimmt Zahl und Stärke der einzelnen Strukturelemente des Knochens, der Lamellen der kompakten Substanz- und der Spongiosabälkchen.
2. Ansatz und Richtung der einwirkenden Kräfte bestimmt die Anordnung dieser Strukturelemente, damit den Typus der inneren Struktur sowohl wie den der äusseren Form.

Zur Ergänzung desjenigen, was in der früheren Arbeit zur Begründung dieser beiden Thesen angeführt worden ist, soll eben die vorliegende Arbeit dienen.

Dass die beiden Sätze nur auf völlig gesundes Knochengewebe Bezug haben können, dürfte sich wohl von selbst verstehen. Wo irgendwelche pathologische Reizzustände eine Wucherung des Knochengewebes entzündlicher oder geschwulst-

---

[1]) H. H. Hirsch, Ueber Amputationsstümpfe im Allgemeinen und eine neue Amputationsmethode im Besonderen. Kieler Inaug.-Diss. 1893/94, No. 42, S. 16—25.

artiger Natur veranlasst haben, kann gewiss von einer funktionellen Gestalt des Knochens nicht mehr die Rede sein.

Ein anderer Punkt bedarf noch einer kurzen Erörterung. Wolff pflegt die Funktion, beziehungsweise die Eigenschaft der Anpassungsfähigkeit an funktionelle Reize, schlechtweg das einzige Motiv der Knochenformen zu nennen, Zschokke betont dagegen, auch das Moment der Vererbung sei zu berücksichtigen. Man kann, glaube ich, die Knochenformen als rein funktionell betrachten und doch zugleich die Bedeutung der Vererbung anerkennen, — auf Grund folgender Ueberlegung.

Die normalen Formverhältnisse eines jeden Organismus sind zur Hauptsache auf Vererbungsvorgänge zurückzuführen: Die Vererbung bestimmt die Richtung und die Grenzen, in welchen beziehungsweise innerhalb welchen die Entwicklung eines Individuums normaler Weise vor sich geht, sie bestimmt die erste Anlage und das Wachsthum der einzelnen Organe. Damit zeichnet sie zugleich auch schon die Linien vor, in welchen die Beanspruchung der Knochen im Wesentlichen erfolgen muss. Dem entsprechend gestaltet sie die Anlage und die Grösse des Stützorganes. — Die Verschiedenheit zwischen dem Skelet eines Menschen und demjenigen eines Rindes ist auf das Gesetz der Vererbung zurückzuführen, wonach aus den betreffenden Keimen die beiden verschiedenartigen Organismen sich entwickelten. Und wenn das Schienbein eines Erwachsenen etwa die vierfache Länge desjenigen vom Neugeborenen besitzt, so entsteht diese Formveränderung nicht durch den Einfluss der Funktion, sie ist vielmehr darauf zurückzuführen, dass dem befruchteten Keime von vorneherein die Eigenschaft innewohnte, sich zu einem Individuum bestimmter Grösse zu entwickeln, also wiederum auf das Gesetz der Vererbung. Somit ist die Sachlage folgende:

Die Vererbung bestimmt gleichsam in groben Zügen die Umrisse des Skelets, indem sie die Bahnen der Beanspruchung, welcher sich die Knochen in ihrer Form anpassen, von vorneherein im Wesentlichen festlegt. Von der individuellen Lebensweise hängen die feineren Eigenthümlichkeiten der Beanspruchung der einzelnen Knochen ab, und durch Anpassung hieran entstehen die feineren Eigenthümlichkeiten der Knochenformen.

Solcherweise bedingen Vererbungs- und Anpassungsvorgänge zusammen die funktionelle Gestalt der Knochen.

Nunmehr will ich denn versuchen, das Zurechtbestehen eines Gesetzes der funktionellen Knochengestalt nachzuweisen, d. h. also jene Streitfrage dahin zu entscheiden, dass lediglich die funktionelle Beanspruchung und nicht irgendwelche Druckwirkungen anliegender Weichtheile die Knochenformen beeinflussen. Zu dem Behufe soll zunächst der Nachweis versucht werden, dass Druckwirkungen anliegender Weichtheile in Wirklichkeit **unmöglich** einen formbestimmenden Einfluss ausüben können; sodann will ich an dem Beispiel des Schienbeines zu zeigen versuchen, wie es sich durch die Analyse der mechanischen Beanspruchung, bei Berücksichtigung der zutreffenden Gesetze der Mechanik, insbesondere der Festigkeitslehre, feststellen lässt, dass die gesammte Gestaltung eines Knochens, die äussere Form ebenso wie die innere Struktur, seiner Funktion **thatsächlich** in der vollkommensten Weise angepasst ist.

Bevor ich jedoch in die weiteren Erörterungen eintrete, empfinde ich das Bedürfniss, Herrn Geheimer Medicinalrath Professor Dr. Rudolf Virchow meinen ergebensten Dank auszusprechen, einmal dafür, dass er persönlich mir einschlägige Präparate aus den reichhaltigen Sammlungen des Berliner pathologischen Instituts ausgewählt und erläutert hat, sodann auch besonders dafür, dass er mir erlaubt hat, aus den platyknemischen Schienbeinen zweier werthvollen, den Sammlungen der Berliner anthropologischen Gesellschaft angehörenden Skelette Querscheiben herauszusägen.

Zu ganz besonderem Dank verpflichtet bin ich ferner Herrn Professor Dr. Hermann Munk für seine anregende und in mancher Hinsicht fördernde Theilnahme an der Entwickelung der vorliegenden Arbeit. Herr Professor Munk hat zuerst meine Aufmerksamkeit auf den Gegenstand der Platyknemie hingelenkt.

Erster Theil.

Der vermeintliche Einfluss von Druckwirkungen der anliegenden Weichtheile auf die Form der Knochen.

Der Vorstellung von dem formbestimmenden Einfluss, welchen Druckwirkungen seitens der anliegenden Weichtheile auf die Knochen besitzen sollen, liegt die Annahme zu Grunde, die Muskeln übten bei ihrem Wachsthum und besonders bei ihrer Thätigkeit einen Druck gegen die Knochen aus. In letzterer Hinsicht glaubt man, je energischer ein Muskel sich kontrahire, um so stärker dränge derselbe in seitlicher Richtung gegen den betreffenden Skelettheil.

Diese Annahme ist auf ihre Richtigkeit zu prüfen. Denn wenn es auch nicht bezweifelt werden kann, dass die Muskeln bei ihren Kontraktionen, um den für den dicker werdenden Querschnitt erforderlichen Raum zu gewinnen, einen Druck auf die umgebenden Theile ausüben müssen, so fragt es sich doch noch sehr, ob diese Druckwirkung unter physiologischen Verhältnissen eine irgendwie erhebliche werden kann, namentlich auch ob dieselbe, ähnlich der von einem thätigen Muskel ausgeübten Zugwirkung, jedesmal mit der Energie der Kontraktion in gleichem Verhältniss an Stärke zunimmt. Vielleicht ist schon die folgende einfache Ueberlegung geeignet, diesen Punkt seiner Aufklärung näher zu bringen.

Umgreift man mit der linken Hand den rechten Oberarm und beugt sodann energisch im rechten Ellenbogengelenk, so fühlt man und sieht man, wie der vorspringende Biceps die Finger kräftig zurückdrängt. Da der sich verdickende Muskel gegen den Knochen hin auf ein unüberwindliches Hinderniss

stösst, so schafft er sich den für seine Ausdehnung erforderlichen Raum nach aussen hin, dadurch, dass er die Hand zurückdrängt. Je fester die letztere den Arm umspannt hält, eine um so grössere Kraftleistung muss natürlich, nämlich nach dem physikalischen Gesetz der Wechselwirkung, der sich kontrahirende Biceps in der Richtung seines Querschnittes bethätigen. Nach demselben physikalischen Gesetz muss dann auch, bei den gegebenen anatomischen Verhältnissen, die Druckwirkung nach der Haut und nach dem Knochen hin mit gleicher Kraft erfolgen, — wie der in einen Spalt hineingetriebene Keil auf die beiden entgegenstehenden Wände immer den gleichen Druck ausüben muss. Also wird die Grösse der seitens eines thätigen Muskels in querer Richtung erfolgenden Druckwirkung bestimmt durch die Grösse des Widerstandes, welcher der Querschnittsausdehnung des Muskels geboten wird, — wohingegen die Gewalt der Zugwirkung eines thätigen Muskels umgekehrt ihrerseits bestimmend ist für die Grösse des mechanischen Effektes (in dem gewählten Beispiele die Schnelligkeit der Beugung des Vorderarms), sowie für die Grösse der dabei erfolgenden Beanspruchung des Knochens.

Was geschieht nun, wenn der Biceps sich unter natürlichen Bedingungen kontrahirt, ohne dass also ein künstlich verstärkter Widerstand seiner Ausdehnung entgegensteht? Es braucht dann eben der sich verdickende Muskel nach den Seiten hin, um den nöthigen Raum zu gewinnen, nur soviel Kraft aufzuwenden, als zur Vorwölbung der Haut erforderlich ist. Die Haut bietet indessen wegen ihrer geringen elastischen Spannung so gut wie gar keinen Widerstand. Und dieser Widerstand bleibt gleich unerheblich, mag die Kontraktion des Muskels das eine Mal mit wenig, das andere Mal mit sehr viel Gewalt geschehen. Somit kann unter natürlichen Bedingungen der thätige Biceps niemals eine nennenswerthe Druckwirkung gegen den Knochen ausüben.

Die anatomisch gleichwerthigen Muskeln müssen sich folgerechter Weise auch in physiologischer Beziehung gleich verhalten. Ist es mechanisch nicht möglich, dass der Biceps bei seinen Kontraktionen einen nennenswerthen Druck auf den Knochen ausübe, so muss auch beispielsweise die Thätigkeit der Wadenmuskeln ohne irgendwelche erhebliche Druckwirkungen auf die Hinterfläche des Schienbeines von Statten gehen, indem auch diese Muskeln mit ganz geringfügigem Kraftaufwande durch Vor-

wölbung der Haut ihre Querschnittsausdehnung bewerkstelligen. Ich sage daher ganz allgemein:

> Bei den gegebenen anatomischen Verhältnissen ist es von vorneherein mechanisch nicht möglich, dass seitens der thätigen Muskeln irgendwelche erheblicheren Druckwirkungen gegen die Knochen stattfinden.

Ein solches Verhalten der Muskeln ist auch von der grössten Wichtigkeit. Es kann doch eben nur dadurch, dass die sich kontrahirenden Muskeln fast ungehindert die Ausdehnung ihres Querschnittes auszuführen vermögen, die ganze entfaltete Kraft sozusagen ungeschwächt für ihre physiologische Aufgabe, den durch die Zugwirkung hervorzubringenden mechanischen Effekt, zur Verwendung gelangen. A. Fick[1]) fasst sogar die Verhältnisse ohne Weiteres in der Weise auf, als ob die in dem erregten Muskel auftretenden elastischen Kräfte allein in diesem Sinne zur Verwendung gelangten, als ob die Grösse des mechanischen Effektes völlig gleich sei der von dem sich kontrahirenden Muskel geleisteten Arbeit. Und diese Auffassung ist gewiss auch berechtigt mit Rücksicht darauf, dass eben nur ein geradezu verschwindend kleiner Theil von Kraft nach der anderen Richtung verloren gehen kann.

Auch die Annahme, dass mit dem Wachsthum der Muskeln eine besondere Druckwirkung gegen die Skelettheile verbunden sei, welche zunehme mit steigender Intensität der Entwicklung, ist lediglich unklaren Gedanken entsprungen. Wenn L. Fick[2]) meint, wo der Muskel hinwachse, schwinde in Folge des Druckes der Knochen, so muss ich dementgegen behaupten, dass während der ganzen Wachsthumsperiode in keinem Augenblick irgend ein Muskel auf den benachbarten Knochen einen stärkeren Druck ausübt als die Muskeln eines völlig entwickelten Menschen, welche nicht mehr wachsen. Oder hat je ein Chirurg die Thatsache beobachtet, dass bei Kindern eine stärkere Spannung zwischen Muskeln und Knochen besteht als bei Erwachsenen? „Im sich entwickelnden Organismus befinden sich die Bestandtheile überall in gegenseitiger genauer Berührung, gleichwohl kann von einer mecha-

---

[1]) A. Fick, Specielle Bewegungslehre. Hermann's Handbuch der Physiologie, Bd. I, Thl. 2.

[2]) L. Fick, a. a. O., S. 21.

nischen Einwirkung auf einander nicht die Rede sein“ (Reichert[1])). — Die Sachlage ist also in Wirklichkeit folgende:

Weder bei dem Wachsthum der Muskeln noch bei der Thätigkeit derselben findet eine besondere Druckwirkung gegen die Knochen statt.

Wenn Druckwirkungen anliegender Weichtheile unter physiologischen Verhältnissen die Knochenformen nicht beeinflussen sollen, so muss sich nachweisen lassen, dass die Thatsachen, aus welchen man die betreffende Annahme hat herleiten wollen, irrthümlich aufgefasst sind.

Als eine solche Thatsache kommt einmal, wie schon in der Einleitung erwähnt worden ist[2]), die Erfahrung der sogenannten Druckusuren in Betracht, wie man die Aushöhlungen bezeichnet, welche durch den Druck einer weichen Geschwulst, z. B. einer Gewebsneubildung oder eines geschwulstartig erweiterten Blutgefässabschnittes, in dem benachbarten Knochen hervorgebracht werden. In diesem Falle wird allerdings thatsächlich durch die Druckwirkung anliegender Weichgebilde die Form des Knochens verändert. Aber —, es ist doch keineswegs der gleiche Vorgang, ob durch lange Zeit auftröpfelndes Wasser ein Stein an der betreffenden Stelle ausgehöhlt wird, oder ob man mit einem Eisenstabe eine Delle in eine Bleiplatte hineindrückt. Dort handelt es sich um eine Zerstörung von Material: Stofftheilchen sind losgelöst und weggespült worden. Die Delle in der Bleiplatte dagegen bedeutet keinen Substanzverlust, vielmehr nur eine Verschiebung der Substanztheilchen. Ebensowenig aber, wie die beiden Vorgänge, die hier äusserlich eine ähnliche Formveränderung bewirken, bezüglich ihrer physikalischen Bedeutung einander gleichzustellen sind, ebensowenig kann man aus jenen pathologischen Beobachtungen die Möglichkeit herleiten, dass die anliegenden Weichtheile die Knochenformen zu prägen im Stande seien.

Wenn andrängende Geschwülste den Knochen zerstören, während Druckwirkungen, wie sie z. B. auf die Gelenkflächen statthaben, keine Schädigung herbeiführen, so ist man vor die Frage

---

[1]) C. B. Reichert, Der Bau des menschlichen Gehirns. II. Abthlg., Leipzig, 1861, S. 32.

[2]) Vergl. oben S. 4.

gestellt, warum Druck das eine Mal den Knochen schädigt, das andere Mal nicht.

J. Wolff[1]) freilich behauptet schlechtweg: „Ueberall da, wo in einem Knochen durch eine drückende Belastung Druckspannungen bewirkt werden, findet Anbildung von Knochensubstanz statt". Jedoch mit noch so bestimmten Behauptungen lassen sich Thatsachen nicht aus der Welt schaffen.

Die von Roux[2]) formulirte Beschränkung der Wolff'schen Behauptung lautet dahin, „dass der Knochen blos an den mit Knorpel bedeckten Flächen starken Druck dauernd aufzunehmen vermag; während an Stellen, wo viel schwächerer Druck auf mit Periost oder Endost bekleidete Flächen stattfindet, Schwund des Knochens an dieser Druckaufnahmefläche die Folge ist". Hierbei scheint mir ausser Acht gelassen zu sein, dass die Knochen auch an nicht überknorpelten Stellen, an welchen nur das Periost eine derbere Beschaffenheit besitzt, unter physiologischen Bedingungen erhebliche Druckwirkungen auszuhalten haben, — man denke nur an den Fersenhöcker oder an den Sitzbeinknorren. Die Roux'sche Ansicht wäre also zum Mindesten dahin zu verallgemeinern, der Knochen könne stärkere Druckwirkungen nur an solchen Stellen aushalten, welche hierzu durch eine bestimmte anatomische Einrichtung — durch Ueberknorpelung oder durch eine derbere Beschaffenheit des Periostes — besonders geeignet seien.

In anderer Weise sucht Zschokke[3]) sich die Dinge zurecht zu legen. „Die Sache wird", meint dieser, „sofort klar, wenn man bedenkt, dass anhaltender Druck und intermittirender eben sehr verschieden wirken. Der erstere wird die Cirkulation hemmen, der letztere fördern. Es ist ferner ein Anderes, wenn der Druck rechtwinklig zur Längsaxe der Gefässe einwirkt, diese letzteren also komprimirt, und ein Anderes, wenn er den Gefässen diagonal entgegenläuft und ihr Lumen eher erweitert als verengt. Nun verlaufen aber, wie ich oben darzuthun versuchte, die Gefässe der Knochen vorwaltend longitudinal, also in der Richtung des physiologischen Druckes. Der normale Belastungsdruck wird also die Cirkulation nicht beeinträchtigen. Wohl aber dürfte dies letztere der Fall sein da, wo der Druck

---

[1]) J. Wolff, Das Gesetz der Transformation etc. S. 88.
[2]) W. Roux, Berliner klin. Wochenschrift, 1893, S. 510.
[3]) Zschokke, a. a. O., S. 48, 49.

beispielsweise seitlich auf den Knochen einwirkt. Hier wird der Säftestrom beeinträchtigt, namentlich dann, wenn der Druck ein permanenter ist."

Zschokke verlangt geradezu physikalisch Unmögliches. Die Knochenwandung zusammenquetschen derart, dass durch Kompression der Gefässkanäle der Säftestrom beeinträchtigt würde, das hiesse den Knochen zertrümmern. Druckbeanspruchungen, welche nicht den Knochen zertrümmern, müssen gewiss auch molekulare Verschiebungen der Knochensubstanz bewirken; aber diese Verschiebungen sind dann so unermesslich gering, dass dadurch die Lichtung der Gefässkanäle so gut wie gar nicht beeinflusst wird, — gleichviel in welcher Richtung der Druck einwirkt.

Dass sodann auch anhaltender Druck nicht schädlich auf den Knochen einzuwirken braucht, beweisen die Gelenke. Wegen des Tonus der Muskulatur haben die Knochen an den Gelenkenden eine geringe Druckwirkung beständig auszuhalten. Andererseits veranlasst die ausgebuchtete Aorta einen Schwund der Wirbelkörper, obwohl die erfolgende Druckwirkung nach jeder Pulswelle nachlässt.

Gleichsam experimentell werden die Vorstellungen Zschokke's durch das Ergebniss einer bestimmten Amputationsmethode widerlegt. Es ist dies die praktisch wie theoretisch gleich bedeutungsvolle osteoplastische Methode bei Amputationen im Bereich der Diaphyse des Schienbeines, welche vor einigen Jahren Bier[1]) eingeführt hat. Dieselbe zeigt zugleich, dass die Erscheinung, dass der Knochen durch Druck das eine Mal geschädigt wird, das andere Mal nicht, auch keineswegs, wie Roux glaubt, zur Hauptsache durch eine verschiedene anatomische Beschaffenheit der Druckaufnahmeflächen bedingt sein kann.

Bei einem Bier'schen Amputationsstumpfe des Unterschenkels ist die eröffnet gewesene Markhöhle des Schienbeines nach unten durch ein der Hinterwand des letzteren entstammendes Knochenstück abgeschlossen. Das umgestellte Stück ist mit seinem Periost und mit den übrigen bedeckenden Weichtheilen in natürlicher Verbindung geblieben. Wenige Wochen nach der Operation vermögen die Patienten beim Gehen das ganze Körpergewicht ohne Beschwerden direkt auf das Stumpfende aufzustützen. Das

[1]) A. Bier, Ueber plastische Bildung tragfähiger Stümpfe nach Unterschenkelamputationen. v. Langenbeck's Archiv. 1893, Bd. 46.

umgestellte Knochenstück vermag also bald die stärksten Druckwirkungen auszuhalten, obwohl diese (zunächst wenigstens, nachher werden Strukturumwälzungen stattfinden) senkrecht zum Verlauf der Gefässkanäle gerichtet sind. Seine als Knochengehfläche dienende Oberfläche vermag bald die stärksten Druckwirkungen aufzunehmen, obwohl sie früher, so lange sie der Hinterfläche des Schienbeines angehörte, niemals eine Druckwirkung aufzunehmen hatte und demgemäss sicher hierfür zunächst auch nicht besonders eingerichtet war.

Um zu ermitteln, in welchem Hauptpunkte die schädlichen Druckwirkungen sich von den nicht schädlichen unterscheiden, muss man eine Anzahl von Erfahrungen zusammenbetrachten.

Ein im Periost oder in dessen Nachbarschaft sich entwickelndes Sarkom, auch wenn die Gewebsneubildung von ganz weicher Beschaffenheit ist, vermag durch seinen Druck den Knochen zu usuriren. Beim Stehen und Gehen, beim Laufen und Springen finden auf die Gelenkenden der betreffenden Knochen die stärksten Druckwirkungen statt, ohne nachtheilige Folgen. Die ausgebuchtete Aorta, bei jedem Pulsschlag gegen die Wirbelsäule andrängend, zerstört dieselbe. Der Amputirte mit Bier'schem Stumpf presst bei jedem Schritt das aufstemmende Stumpfende mit seinem ganzen Körpergewicht gegen die Prothese, und die künstlich gebildete Knochengehfläche leidet keinen Schaden. Die unter der Kopfhaut sich entwickelnde Dermoidcyste kann dem Schädelknochen sehr schädlich werden. Die schwersten Lasten, welche manche Individuen täglich stundenlang auf dem Kopfe zu tragen pflegen, haben noch niemals einen Schwund des Schädeldaches bewirkt.

Aus diesen Erfahrungen scheint mir unverkennbar hervorzugehen, dass der einzige Punkt, in welchem die verschiedenartigen Fälle sich durchweg, grundsätzlich, unterscheiden, die Stärke der erfolgenden Druckwirkung ist.

Der Chirurg vermag das Sarkom oder die Dermoidcyste ohne wesentlichen Kraftaufwand von dem Knochen hinwegzudrängen. Um ein Aortenaneurysma etwas zu komprimiren, ist auch keine grosse Kraftleistung erforderlich. Die in Betracht kommenden Bildungen können alle überhaupt deshalb keinen starken Druck ausüben, weil sie durch solchen selbst zerquetscht werden würden. Sie üben auf den Quadratmillimeter Druckaufnahmefläche etwa

eine Druckwirkung von einigen Grammen aus. — Dass in den anderen Fällen unvergleichlich stärkere Druckwirkungen statthaben, brauche ich wohl nicht weiter auszuführen. Die dort erfolgenden können für den Quadratmillimeter Druckaufnahmefläche bis zu einem Kilogramm betragen, gelegentlich auch wohl noch mehr.

Wenn somit die schädlichen Druckwirkungen alle solche von sehr geringer Stärke, die nicht schädlichen dagegen alle solche von weit, weit grösserer Stärke sind, so muss man wohl aus den angeführten Thatsachen schliessen, dass ein ursächlicher Zusammenhang einerseits zwischen der Schädlichkeit der einen Druckwirkungen und ihrer geringen Stärke, andererseits zwischen der Unschädlichkeit der anderen Druckwirkungen und ihrer weit grösseren Stärke besteht. So geht aus den betrachteten einzelnen Thatsachen die allgemeine Thatsache, das Gesetz, hervor:

> Wo Knochen durch Druck **usurirt** wird, handelt es sich um die Wirkung eines **schwachen Druckes**; starker Druck schädigt den Knochen nicht, er sei denn so stark, dass er ihn sofort zertrümmere.

Der Druck, welcher sich dem Knochen als schädlich erweist, ist ein sehr schwacher im Vergleich zu den Druckbeanspruchungen, wie sie die Knochen physiologischer Weise, z. B. diejenigen der Beine beim Gehen, auszuhalten haben. Andererseits muss der schädliche Druck natürlich immerhin eine gewisse Kraft besitzen. Wenn Druckwirkungen von wenigen Grammen den Knochen zu zerstören vermögen, so brauchen deshalb solche, die nur den Bruchtheil eines Grammes für den Quadratmillimeter Druckaufnahmefläche ausmachen, nicht auch einen schädlichen Einfluss zu besitzen.

Der obige Satz darf auch keineswegs so ausgelegt werden, als ob Druck von einer gewissen, geringen Stärke unter allen Umständen eine Usurirung des Knochens bewirken müsse. Die geringe Stärke des Druckes ist nur die Hauptbedingung der schädlichen Wirkung, in zweiter und dritter Hinsicht kommt es auch auf die anatomische Beschaffenheit der Druckaufnahmefläche (Roux) und auf die Zeitdauer der Druckeinwirkung (Zschokke) an.

An den Gelenkflächen z. B. können ja lange Zeit hindurch die Knochen lediglich durch den Tonus der Muskeln gegeneinander gepresst werden, ohne dass die erfolgende schwache Druckwirkung eine Schädigung der Knochen bedingte. Und wenn die

Dermoidcyste nur ganz kurze Zeit gegen das Schädeldach andrängte, würde dieses gewiss nicht usurirt werden. Der Druck muss hinreichend lange Zeit einwirken, und zwar entweder, wie beim Sarkom oder der Dermoidcyste, dauernd oder, wie beim Aortenaneurysma, mit so kurzen Pausen, dass das Knochengewebe sich nicht jedesmal von der schädlichen Einwirkung erholen kann. Die schwache Druckwirkung erhält also erst dann ihren pathologischen Charakter, wenn sie auf einer Stelle erfolgt, an welcher die Knochenoberfläche zur Druckaufnahme nicht eingerichtet ist, und wenn sie ferner hinreichend lange Zeit hindurch statthat.

Wenn man die Thatsache erkannt hat, dass schwacher Druck den Knochen zu usuriren vermag, starker dagegen nicht, so muss man auch wenigstens den Versuch machen, sich dies aussergewöhnliche Verhalten des Knochens gegenüber Druckeinwirkungen zu erklären.

Die Druckfestigkeit der Knochen ist eine sehr grosse. Nach den Untersuchungen Rauber's[1]) besitzt die kompakte Knochensubstanz für den Quadratmillimeter Querschnitt eine Druckfestigkeit von 11,3 kg bis 16,8 kg. Diese grosse Festigkeit weist gewiss darauf hin, dass es die Funktion der Knochen ist, starke Druckwirkungen auszuhalten.

Auch bindegewebige Theile erfahren physiologischer Weise Druckwirkungen von einigen Grammen pro Quadratmillimeter Druckaufnahmefläche. Die Endsehnen mancher Muskeln werden durch eine Art Führungsbänder in ihrer Lage festgehalten, gegen welche die Sehnen bei jeder Kontraktion der Muskeln mit mässigem Drucke andrängen. Man denke z. B. an die über den Fussrücken verlaufenden Sehnen und an den dort befindlichen Bandapparat. Eine funktionelle Beanspruchung des Knochengewebes kann füglich nicht durch so schwachen Druck bedingt werden, wie ihn schon bindegewebige Theile auszuhalten vermögen. Ich meine also:

> Der Knochen wird **funktionell** beansprucht nur durch **starke** Druckwirkungen, nicht dagegen durch schwache.

Das Knochengewebe besteht aus den weichen Zellen und aus

[1]) Rauber, a. a. O., S. 35.

der harten Knochensubstanz. Die Zellen besitzen zahlreiche sehr feine Fortsätze, welche als ein dichtmaschiges Netz das harte Material durchziehen. Sie haben den harten Theil geschaffen, und dienen weiterhin zur Erhaltung desselben. Denn in dem auf seine Festigkeit beanspruchten Knochen vollziehen sich ebensogut Stoffwechselvorgänge, wie in irgend einem anderen funktionirenden Gewebe. Wozu wäre derselbe denn sonst so reichlich von Gefässen durchsetzt, welche in den Havers'schen Kanälen ihren Verlauf nehmen. Wären diese Gefässe nach geschehener Bildung des Knochens überflüssig, so müssten sie sich doch, analog den Nabelstranggefässen, nachher zurückbilden. Die bei der Funktion der Knochen stattfindenden Stoffwechselvorgänge werden durch die Zellen vermittelt. Die letzteren müssen unversehrt sein, wenn der anliegende Bezirk der harten Knochensubstanz weiter bestehen und seiner Funktion gerecht werden soll.

Wenn nun ein Amputirter mit Bier'schem Stumpf diesen immer wieder starken Druckwirkungen aussetzt, so muss das Periost des, aus der Hinterwand des Schienbeines stammenden, Knochenstückes am Ende des Stumpfes gewisse Veränderungen erfahren. Es muss eine derbere Beschaffenheit annehmen, ähnlich wie dies die äussere Haut unter der wiederholten Einwirkung stärkeren Druckes thut. Insbesondere muss also auch die zartere, innere Schicht des Periostes, welche die der Ernährung der peripheren Knochentheile dienenden Zellen enthält, eine derartige Umwandlung durchmachen. Die starken Druckwirkungen, welche diese Vorgänge im Periost veranlassen, rufen zugleich in dem Knochenmaterial starke Druckspannungen hervor, d. h. sie bedingen zugleich eine funktionelle Beanspruchung des Knochens. „Der trophische Reiz der Funktion" (Roux) veranlasst die tiefer, in der Knochensubstanz selbst, liegenden Zellen, die Ernährung der peripheren Knochenbezirke, mit welchen diese ja durch zahlreiche Fortsätze in Verbindung stehen, mitzuübernehmen. So bleibt trotz der Beeinflussung der zugehörigen Zellen das periphere Knochenmaterial erhalten.

Der schwache Druck dagegen, welchen eine andrängende Geschwulst verursacht, reicht nicht aus, in dem Knochenmaterial so starke Spannungen hervorzurufen, wie sie von dem Knochen erst als funktionelle Beanspruchung empfunden werden; er reicht jedoch aus, eine Schädigung des Periostes, namentlich der die zartere innere Schicht desselben bildenden Knochenzellen, zu veranlassen. Die Zerstörung dieser Zellen bedeutet in dem ge-

gebenen Falle zugleich diejenige des anliegenden Knochenmaterials; denn es fehlt ja diesmal der trophische Reiz der Funktion, welcher die tiefer liegenden Zellen veranlasste, die Ernährung des peripheren Materials mitzuübernehmen. Dann wirkt der schädliche Druck auf die zarten Zellfortsätze in den eröffneten Knochenröhrchen. Er zerstört diese Zellfortsätze und damit die umgebenden Knochentheilchen. So erreicht die Geschwulst die folgende Zellenschicht. Jetzt wird diese geschädigt und mit ihr der zugehörige Bezirk von Knochensubstanz. Auf diese Weise bewirkt der schwache Druck die fortschreitende Usurirung des Knochens.

Bei solcher Betrachtung der Dinge erscheint mir wenigstens die auf den ersten Blick so auffällige Thatsache ganz natürlich, die Thatsache, dass der Knochen starke Druckwirkungen, durch welche alle die übrigen, weichen Gebilde, ausgenommen die Haut, zerquetscht würden, auszuhalten vermag, während er durch schwache Druckwirkungen in der gleichen Weise geschädigt werden kann wie alle übrigen Organe, also auch wie die weiche Masse des Gehirns.

Wenn die Flüssigkeit, welche den Zwischenraum zwischen den das Gehirn umhüllenden Häuten und das System von Hohlräumen im Innern des Gehirns erfüllt, vermehrt ist, so erfolgt unter dem Einfluss der schwachen Drucksteigerung auf der einen Seite ein Schwund des Gehirns, auf der anderen Seite, in ganz analoger Weise, ein Schwund der Schädelknochen. Allerdings bleibt hierbei die Dura mater erhalten, es scheint also hier keine Schädigung des Periostes dem Schwund des Knochens vorausgegangen zu sein. Aber für die Ernährung des Knochens, beziehungsweise des peripheren Knochenmaterials, kommt allein die dem Knochen direkt anliegende Zellenschicht in Betracht. Diese Zellkörper sind von viel weicherer Konsistenz als das eigentliche straffe Dura-Gewebe. Bei einem gesteigerten Druck in der Hirnflüssigkeit erfahren dieselben eine Pressung zwischen dem straffen Theile der Dura einerseits, dem harten Knochen andererseits. Solcherweise kommt es zu einer Schädigung der dem Knochen anliegenden Zellenschicht, und hierdurch wird weiterhin der Schwund des zugehörigen Knochenmaterials veranlasst. Dass der aus dem straffen Bindegewebe bestehende Theil der Dura durch den schwachen Druck nicht geschädigt wird, kann nicht weiter auffallen: dieses Gewebe ist dehnbar

genug, der Druckwirkung nachzugeben; derartiges, parallelfaseriges straffes Bindegewebe hat ja auch, wie schon an früherer Stelle erwähnt worden ist, unter physiologischen Bedingungen schwache Druckwirkungen auszuhalten.

Aehnlich wie bei der allgemeinen Druckatrophie des Schädeldaches erklärt sich natürlich auch die Erhaltung des straffen Dura-Gewebes in manchen Fällen, wo eine umschriebene Geschwulst von innen her gegen die Schädelkapsel andrängend, eine umschriebene Usur des betreffenden Knochens bewirkt. Die Verdickungen, welche man häufig in der sonst atrophischen Wandung eines hydrocephalischen Schädels findet, sind darauf zurückzuführen, dass ausser der Druckwirkung ein Zustand pathologischer Reizung an der betreffenden Stelle in der dem Knochen anliegenden Schicht der Dura mater, beziehungsweise in dem Knochengewebe selbst, vorgelegen hat.

Die makroskopisch erkennbare Thatsache der Usurirung beweist, dass durch eine schwache Druckwirkung eine Schädigung des Knochens, ein Schwund der Knochenzellen und des harten Knochenmaterials, bedingt werden kann. Welcherlei mikroskopische Vorgänge hierbei sich abspielen, ist für den Zweck dieser Untersuchungen belanglos. Ob der schädliche Druck primär auf die Kapillargefässe oder auf die Zellen einwirkt, ob er mechanisch die Zellen zerstört und etwa durch Kohlensäurestauung die Knochensubstanz auflöst, oder ob er zunächst die Zellen reizt, so dass diese, sich vergrössernd und vielkernig werdend, die Knochensubstanz selbst auflösen, um schliesslich doch durch den fortdauernden Druck zerstört zu werden, oder ob die feineren Vorgänge in anderer Weise sich abspielen, mag dahingestellt bleiben.

Soviel zur Erläuterung der Frage, warum Druck den Knochen das eine Mal schädigt, das andere Mal nicht. Auf jeden Fall dürfte klar geworden sein, dass die pathologische Erfahrung der Druckusuren in keiner Weise geeignet ist, die Vorstellung von dem formbestimmenden Einfluss einer Druckwirkung der den Knochen anliegenden Weichtheile zu stützen, dass dieselbe vielmehr mit der grössten Bestimmtheit darauf hinweist, dass Druckwirkungen anliegender Weichtheile unter physiologischen Bedingungen auf die Knochen weder statthaben können, noch statthaben dürfen.

Wie die Druckusuren beweisen, dass der Knochen zerstört werden würde, so zeigt eine andere Erfahrung, dass auch die Muskeln selbst durch den vermeintlichen Druck geschädigt werden müssten: die Druckatrophien, wie sie beispielsweise an gewissen Handmuskeln von Plätterinnen häufig beobachtet werden, entstehen doch eben dadurch, dass die betreffenden Muskeln bei ihrer Kontraktion immer wieder starken Druckwirkungen ausgesetzt sind.

Die andere Thatsache, welche mit zu der Annahme verleitet hat, dass die Knochenformen durch Druckwirkungen der anliegenden Weichtheile beeinflusst würden, ist der Umstand, dass die Endsehnen mancher Muskeln in rinnen- und furchenförmigen Vertiefungen der Knochenoberfläche verlaufen, welche der Form der Sehnen genau angepasst erscheinen. Diese Vertiefungen glaubt man eben unbedingt als „Eindrücke" der Sehnen auffassen zu müssen[1]).

Gegen eine derartige Auffassung der Rinnen und Furchen in der Knochenoberfläche ist zunächst einzuwenden, dass ebensowenig, wie die thätigen Muskeln selbst, ihre Endsehnen jemals einen besonderen Druck gegen die Knochen ausüben. Dieselben gleiten entweder, wie beispielsweise die Sehne des langen Bicepskopfes im Sulcus bicipitalis, ohne jeden Druck in den sie umschliessenden Scheiden über den Knochen hinweg, wobei sogar fast jede Reibung wegfällt, indem die beiden Blätter der Sehnenscheide durch die Synovia schlüpfrig erhalten werden, — oder die Sehnen drängen gar bei jeder Kontraktion der betreffenden Muskeln von dem Knochen weg gegen den ihre Lage sichernden Bandapparat. So verhalten sich z. B. die Endsehnen der Hand- und Fingerstreckmuskeln dort, wo sie in die rinnenförmigen Vertiefungen der dorsalen Fläche des distalen Radiusendes eingelagert sind. Meiner Ansicht nach muss schon der Umstand, dass überall dort, wo Sehnen einem Knochen anliegen, Gebilde von so zarter Beschaffenheit wie die Sehnenscheiden anzutreffen sind, es von vorneherein als ausgeschlossen erscheinen lassen, dass hier jemals irgendwelche erhebliche Druckwirkungen stattfinden. — Wenn aber die fraglichen Vertiefungen keine Eindrücke darstellen, so muss ihre Entstehung in anderer Weise zu erklären sein.

[1]) Vergl. oben S. 4.

Wie schon an früherer Stelle erwähnt worden ist, ist es eine längst bekannte Thatsache, dass den Ansätzen der Sehnen und Bänder regelmässig rauhe Linien, leisten- oder höckerartige Vorsprünge der Knochen entsprechen, und dass diese Verdickungen der Knochenwandung um so grösser werden, ein je kräftigerer Zug von den betreffenden Muskeln und Bändern ausgeübt wird. Die funktionelle Bedeutung dieser Erscheinungen leuchtet ohne Weiteres ein. Die Knochenvorsprünge bedeuten eben eine Verstärkung der Knochenwand an den Stellen der direkten Gewalteinwirkung, oder um als Mechaniker zu reden, sie erhöhen die Schubfestigkeit der betreffenden Wandungsabschnitte gegenüber den dort angreifenden Kräften. Wenn nun aber zwei derartige Vorsprünge nahe nebeneinander zur Ausbildung gelangen, so muss der zwischen ihnen verbleibende nicht verstärkte Theil der Knochenoberfläche als eine Rinne erscheinen. Ich meine also:

> Die Rinnen und Furchen in der Knochenoberfläche, in welchen die Endsehnen mancher Muskeln verlaufen, sind **nicht** in den Grundumriss des Knochenquerschnittes **hineingedrückt**, sie entstehen vielmehr durch ein seitliches Hervortreten von Knochenmaterial aus dem Grundumriss des Querschnittes heraus, infolge dort angreifender **Zugkräfte.**

Soll diese Auffassung richtig sein, so müssen sich in jedem Falle die seitlich angreifenden Zugkräfte nachweisen lassen, welche dort die Verstärkung der Knochenwandung erfordern.

Für jene rinnenförmigen Vertiefungen in der dorsalen Fläche des distalen Radiusendes vermag dies beispielsweise leicht zu geschehen. Zwischen den einzelnen Vertiefungen befinden sich die knöchernen Vorsprünge, an welche das Ligamentum carpi dorsale angeheftet ist. Gegen dieses Band drängen die Endsehnen der Hand- und Fingerstrecker bei jeder Kontraktion dieser Muskeln und spannen dasselbe an. Eine entsprechende Schubspannung muss dabei die Knochenwandung an den einzelnen Anheftungsstellen des querverlaufenden Bandes erfahren: Dadurch wird an den betreffenden Stellen die Ausbildung der Vorsprünge veranlasst.

Auch bei der gewöhnlich recht tiefen Rinne an der Vorderfläche des proximalen Humerusendes, welche zur Aufnahme der Sehne des langen Bicepskopfes dient, lassen sich ohne Weiteres

die seitlich einwirkenden Zugkräfte nachweisen, welche die angrenzenden Erhebungen der Knochenoberfläche verursachen. Auf der einen Seite inseriren mehrere kräftige Muskeln (die Mm. supraspinatus, infraspinatus, teres minor, pectoralis major) und bedingen durch ihren Zug die Ausbildung des Tuberculum maius und der zugehörigen Crista, auf der anderen Seite veranlassen ähnlich starke Muskeln (die Mm. subscapularis, latissimus dorsi, teres maior) das Hervortreten des Tuberculum minus und der Crista desselben. Dort, wo an der Umgrenzung der Gelenkfläche die Muskelvorsprünge aufhören, hat auch die Rinne ihr Ende.

Dass in Wirklichkeit der Sulcus bicipitalis nicht durch die darin verlaufende Sehne hervorgebracht wird, sondern lediglich aus dem Vorhandensein der angrenzenden Vorsprünge zu erklären ist, geht auch, wie mir scheint, ganz unzweideutig aus einer Beobachtung Joessel's[1]) hervor, welche einen Fall von beiderseitigem Fehlen des langen Bicepskopfes betrifft. Joessel berichtet darüber, der Sulcus intertubercularis sei beiderseits deutlich vorhanden und lasse sich bis zum überknorpelten Gelenkkopf verfolgen, doch sei der Kanal seichter als gewöhnlich. Trotz des Mangels der Sehnen waren also die Rinnen thatsächlich vorhanden. Die seichtere Beschaffenheit dieser ist durchaus ohne Belang: Die Tiefe einer Rinne hängt füglich ab von der Höhe der angrenzenden Knochenvorsprünge. Die Höhe der letzteren aber ist zugegebenermaassen je nach der Muskelstärke eines Individuums verschieden. Man hat daher zur Erklärung der seichteren Beschaffenheit der Rinnen nur anzunehmen, dass es sich um ein etwas muskelschwaches Individuum gehandelt habe. Die Thatsache des Fehlens der langen Bicepsköpfe spricht ja auch mindestens nicht gegen eine solche Annahme.

Die fragliche Beobachtung hat denn auch schon bei Joessel selbst Bedenken gegen die übliche Vorstellung von der Bedeutung der Rinnen wachgerufen; er meint nämlich, dieselbe zeige, „dass der Sulcus bicipitalis eine wenigstens zum Theil von der Bicepssehne unabhängige Bildung darstellt". Roux[2]) indessen hat aus ihr, über die seichtere Beschaffenheit der

[1]) G. Joessel, Zeitschr. f. Anatomie von His u. Braune. 1877, Bd. II, S. 143.

[2]) W. Roux, Der Kampf der Theile im Organismus. Leipzig, 1881, S. 51 ff.

Rinnen das Vorhandensein dieser ganz vergessend, sogar einen Beweis für die Entstehung der Rinnen durch den Druck der Sehnen ableiten wollen: das heisst aber doch, die Sachlage geradezu umkehren.

Auf dieselbe Weise, wie in den erörterten Beispielen, dürften sich die meisten Vertiefungen der Knochenoberfläche, gleichviel ob Muskeln, Sehnen, Nerven oder Gefässe darin eingelagert sind, durch seitlich angreifende Muskel- und Bänderspannungen erklären lassen. Wo aber derartige funktionelle Einflüsse als die mittelbare Ursache nicht nachweislich sind, dort muss man eben solche Eigenthümlichkeiten des Knochenreliefs ganz ebenso wie jene Kanäle, in welchen die Nerven und Gefässe die Knochenwandung durchsetzen, sich dadurch erklären, dass sie von vorneherein in die Anlage des Knochens mitaufgenommen sind, dass sie also erblich entstandene Einrichtungen vorstellen. Ebensowenig, wie es denkbar ist, dass die Nerven und Gefässe nachträglich mechanisch die Knochenwandung durchbohren, ebensowenig können physiologische Vertiefungen der Knochenoberfläche jemals Eindrücke anliegender Weichgebilde vorstellen.

Auch noch durch weitere Thatsachen lässt sich die Unrichtigkeit der zu widerlegenden Vorstellung mittelbar beweisen. Man muss nur methodisch vorgehen, um diese Thatsachen aufzufinden.

Wenn ich vorhin behauptet habe, ebensowenig wie die thätigen Muskeln selbst übten ihre Endsehnen jemals einen besonderen Druck gegen die Knochen aus, so muss ich bedacht haben, ob nicht doch der Verlauf einiger Sehnen ein solcher ist, dass dieselben bei jeder Kontraktion der betreffenden Muskeln nothwendig gegen den Knochen angedrängt werden müssen. Offenbar müsste dies überall da zutreffen, wo die Sehnen, wie beispielsweise bei gebeugtem Knie die Sehne des Unterschenkelstreckmuskels, im Winkel über knöcherne Theile hinwegziehen. Nun findet man aber in dem gewählten Beispiel das Sehnengewebe gerade an der betreffenden Stelle durch die knöcherne Kniescheibe ersetzt. Aehnlich zeigt es sich, um ein anderes Beispiel zu betrachten, bei der Endsehne des M. peroneus longus, dass diese dort, wo sie gegen die Fusswurzelknochen andrücken muss, knorpelig umgewandelt ist.

Soll diese Erscheinung eine Bedeutung besitzen, soll ein ursächlicher Zusammenhang obwalten zwischen dem Umstande, dass die Sehnen an den betreffenden Stellen starke Druckwirkungen erfahren müssten, und der Thatsache, dass gerade dort das Sehnengewebe durch härteres Gewebe ersetzt ist, dann muss man auch an den anderen Stellen, wo Sesambeine angebracht sind, starke Druckwirkungen nachzuweisen im Stande sein.

Als ein weiteres Sesambein kommt das Os pisiforme in der Endsehne des M. flexor carpi ulnaris in Betracht. Es dürfte nun auch wohl einleuchten, dass an der Stelle, wo die Sehne auf dem Wege zu ihren Ansatzpunkten durch das Sesambein unterbrochen wird, bei jeder Dorsalflexion der Hand mehr oder weniger starke Druckwirkungen gegen den benachbarten Handwurzelknochen statthaben müssen. Eine Dorsalflexion findet fast bei jeder Greifbewegung statt. Ganz besonders kräftig erfolgt eine solche, wenn man sich mit dem Handteller in irgend einer Weise aufstützt: hierbei kann es sogar leicht vorkommen, dass das Erbsenbein auch noch direkt durch die als Stützpunkt gewählte Unterlage gegen den betreffenden Handwurzelknochen angepresst wird.

Zwei kleine Sesambeine befinden sich ferner in der Kapsel des ersten Metatarsophalangeal-Gelenkes. Diese nehmen gerade die Stelle ein, wo das Kapselband einen starken Druck zwischen Boden und dem Köpfchen des betreffenden Mittelfussknochens auszuhalten hätte. Wenn die Sehnen dort, wo sie starkem Druck ausgesetzt wären, durch härteres Gewebe ersetzt sind, so muss eben das Gleiche bezüglich der Kapselbänder der Fall sein, denn diese bestehen wie jene aus parallelfaserigem, straffem Bindegewebe. Uebrigens kann man ja die fraglichen Sesambeinchen auch so auffassen, als seien sie in die Endsehnen der daran inserirenden Muskeln des Grosszehenballens eingelassen.

Um die physiologische Bedeutung dieser Einrichtungen zu verstehen, muss man erwägen, dass an rein mechanisch funktionirende Theile füglicher Weise nur solche Anforderungen gestellt werden dürfen, denen sie vermöge ihrer physikalischen Eigenschaften zu entsprechen im Stande sind. Die aus parallelfaserigem Bindegewebe bestehenden Sehnen und Bänder besitzen zwar eine sehr grosse Zugfestigkeit gegenüber Krafteinwirkungen, welche parallel zu ihrer Faserrichtung erfolgen, aber nach keiner Richtung eine irgendwie erhebliche Druckfestigkeit. Knorpeliges und knöchernes Gewebe dagegen besitzt eine grosse

Zugfestigkeit und zugleich eine sogar noch grössere Druckfestigkeit. — Die physiologische Bedeutung der Sesambeine (einschliesslich des Knorpels in der Peroneussehne) ist somit folgendermaassen zu definiren:

> Die Einschaltung der Sesambeine setzt die Sehnen in den Stand, an den betreffenden Stellen bei einer starken Zugspannung zugleich einen starken Druck gegen die knöcherne Unterlage auszuhalten.

Solange man nicht erkannt hatte, dass die Sehnen im Allgemeinen gar keinen Druck gegen die Knochen ausüben, musste man natürlich auch über den Zweck der Sesambeine völlig im Unklaren sein. So findet man denn in den Lehrbüchern der Physiologie entweder nichts oder nur Unrichtiges hierüber gesagt.

Ed. Weber[1]) hat die Aufgabe der Patella darin erblicken wollen, dass durch ihre Einschaltung eine Vergrösserung des Ansatzwinkels der Endsehne des Unterschenkelstreckers an dem Schienbein bewirkt, und dass hierdurch eine bessere Ausnutzung der von jenem Muskel geleisteten Arbeit ermöglicht werden soll. In diesem Sinne hat er dieselbe geradezu als eine Art Richtungsrolle bezeichnet. Mit einer solchen kann aber, meine ich, die Kniescheibe schon deshalb sicher nicht verglichen werden, weil sie einen Bestandtheil der Sehne bildet. Die Richtungsrolle, welche einem Zugbande eine andere Richtung giebt, befindet sich immer ausserhalb dieses Zuges. Der Vergleich wäre also erst statthaft, wenn die Kniescheibe am Oberschenkelbein befestigt wäre und die Quadricepssehne über sie hinwegglitte. Die ganze Erklärung ist von vorneherein auch darum sehr unwahrscheinlich, weil durch Einschaltung der Patella der Ansatzwinkel der Sehne nur sehr unwesentlich vergrössert wird. Zudem ist es klar, dass alle die oben besprochenen Einrichtungen als analoge aufzufassen, d. h. in ein und derselben Weise zu erklären sind. In den anderen Fällen aber dürfte eine derartige Deutung ohne Weiteres als haltlos erscheinen.

Gerade das Beispiel der Kniescheibe zeigt übrigens besonders deutlich, dass mit der vorhin gegebenen Erklärung der Bestimmung der Sesambeine das Richtige getroffen ist. Wie näm-

[1]) Vergl. J. Munk, Die Physiologie des Menschen und der Säugethiere. 3. Aufl., Berlin, 1892.

lich an späterer Stelle ersichtlich werden wird[1]), kann jene bei physiologischer Verwendung der unteren Gliedmaassen einen Druck von mehreren hundert Kilogrammen auszuhalten haben. Durch einen solch starken Druck müsste die Sehne völlig zerquetscht werden. Dass dagegen das feste knöcherne Gebilde so hochgradige Druckbeanspruchung auszuhalten vermag, ist schon durch Messerer[2]) experimentell nachgewiesen worden.

Die richtige Erkenntniss der physiologischen Aufgabe der Sesambeine ist nun, um wieder zum eigentlichen Thema zurückzukehren, hierfür insofern von grossem Werthe, als die Thatsache, dass dort, wo Sehnengewebe nothwendig einen stärkeren Druck erfahren müsste, dasselbe durch härtere Gewebe ersetzt ist, auch wiederum mit Entschiedenheit darauf hinweist, dass umgekehrt dort, wo die Sehnen unverändert dem Knochen anliegen, keine erheblicheren Druckwirkungen stattfinden.

Ein weiteres Moment der Widerlegung lässt sich aus der Verwendung der Muskulatur herleiten.

Wenn gezeigt werden konnte, dass der Biceps brachii unter gewöhnlichen Bedingungen keinen nennenswerthen Druck gegen den Knochen ausübt, wenn ferner jene Erfahrung bezüglich der Druckatrophien der Muskeln darauf hinzudeuten scheint, dass die sich kontrahirenden Muskeln durch starke Druckwirkungen selbst geschädigt werden würden, so drängt dies alles zu der Frage, ob nicht doch die Verwendung von kontraktilem Gewebe mancherorts eine derartige sei, dass dasselbe, sobald es in Thätigkeit tritt, eine starke Druckwirkung auszuhalten hat. Offenbar trifft dieser Fall bei allen sogenannten Hohlmuskeln zu, in welcher Form das kontraktile Gewebe bei allen inneren Organen, ausgenommen des Nervensystem, vorkommt. Wenn z. B. die Muskulatur der Magenwandung, oder diejenige der Harnblase oder diejenige eines Blutgefässes sich kontrahirt, so muss dieselbe einen entsprechenden Druck von Seiten des Inhaltes des umschlossenen Hohlraumes erfahren. Aber

---

[1]) Vergl. unten die Anmerkung[2]) S. 40.

[2]) O. Messerer, Ueber Elasticität und Festigkeit der menschlichen Knochen. Stuttgart, 1880, S. 92.

dort, wo die Verhältnisse so liegen, derart also, dass das kontraktile Element, indem es sich in seiner Längsrichtung zusammenzieht, zugleich und zwar eben in Erfüllung seiner physiologischen Aufgabe einen entsprechenden Druck in querer Richtung auszuüben, beziehungsweise auszuhalten hat, findet man nirgends **quergestreifte Muskelfasern**, sondern überall **glatte Muskelzellen.** Und die letzteren werden auch nicht, wie jedermann weiss, wenn sie bei ihrer Thätigkeit einen stärkeren Druck erfahren, hierdurch zur Atrophie gebracht, sondern im Gegentheil zur Hypertrophie, wie beispielsweise die Magenmuskulatur bei Pylorusstenose oder die Blasenmuskulatur bei Erschwerung der Harnentleerung. So ergiebt sich denn aus der Art der Verwendung und ebenso aus der pathologischen Erfahrung, dass zwischen den anatomisch unterscheidlichen kontraktilen Elementen in physiologischer Hinsicht die folgende grundsätzliche Verschiedenheit besteht:

> Die quergestreiften Muskelfasern vermögen lediglich Zugwirkungen hervorzurufen, die glatten Muskelzellen zugleich Zug- und Druckwirkungen.

Diese physiologische Verschiedenheit beider Muskelarten verdient, wie mir scheint, mindestens die gleiche Beachtung, wie jener andere, längst bekannte Unterschied ihrer Funktionsweise, welcher darin besteht, dass die Zusammenziehung der quergestreiften Muskeln rasch, die der anderen langsam sich vollzieht. Eine eingehendere Erörterung dieser Verhältnisse, namentlich eine Würdigung der besonderen Zwischenstellung, welche auch hier die Herzmuskulatur einnimmt, kann an dieser Stelle nicht stattfinden. Es genügt, festgestellt zu haben, dass überall, wo ein Muskel Druckwirkungen physiologischer Weise hervorbringen muss, glatte Muskelzellen angebracht sind, dass somit dort, wo quergestreifte Muskulatur vorliegt, von Druckwirkungen nicht die Rede sein kann.

Schliesslich möchte ich den betreffenden Autoren die Frage vorlegen, durch welchen biologischen oder physikalischen Vorgang der vermeintliche Druck der anliegenden Weichtheile seinen formbestimmenden Einfluss auf die Knochen zur Geltung bringen soll. Eine Resorption von Knochensubstanz kann der Muskeldruck, wie die Erfahrung der Druckusuren beweist, nicht

veranlassen, ohne vorher das Periost, zum mindesten die innere Zellenschicht desselben, zerstört zu haben. Ebensowenig kann aber auch von einer **Prägung** der Knochenformen durch den Druck der anliegenden Weichtheile die Rede sein. Bei dem physikalischen Vorgang der Prägung findet zwar nicht eine Zerstörung von Material statt, aber es handelt sich immer um die Veränderung der Form eines **weicheren** Körpers durch den Druck eines **härteren.** Alle physikalischen Gesetze gelten ebenso gut für die belebten, wie für die unbelebten Körper. Daher bezieht man z. B. mit vollem Recht jenen Eindruck in der Unterfläche der menschlichen Leber, in welchen die Niere mit ihrer Kuppe hineinragt, auf die festere Konsistenz der letzteren. Wäre die Leber das härtere Organ, so würde zweifellos sie die Form der Niere beeinflussen. Also geschähe es gegen alle Erfahrung, gegen jedes Gesetz, wenn die Weichgebilde im Stande wären, die Form der harten Knochen zu prägen.

Das Ergebniss des ersten Theiles der vorliegenden Arbeit fasse ich zum Schluss in folgenden Satz zusammen:

> Wie es bei den gegebenen anatomischen Verhältnissen von vorneherein mechanisch nicht möglich ist, dass die vermeintlichen Druckwirkungen anliegender Weichtheile auf die Knochen stattfinden, so wäre es auch physikalisch und biologisch gleich unerklärlich, wie solche, physiologischer Weise, die Form der harten Knochen beeinflussen sollten.

Zweiter Theil.

Die funktionelle Gestalt des Schienbeines.

Zum Nachweis der funktionellen Gestalt des Schienbeines ist füglicher Weise in erster Linie nöthig, zu untersuchen, welcher Art die Funktion des Schienbeines gewöhnlich ist, mit anderen Worten, innerhalb welcher allgemeiner Grenzen sich die mechanische Beanspruchung desselben bei der physiologischen Verwendung der unteren Gliedmaassen vollzieht (Abschnitt I, S. 33).

Um zeigen zu können, dass gegenüber der ermittelten Funktion die Form des Schienbeines gemäss den Gesetzen der Mechanik die zweckmässigste ist, sind naturgemäss in zweiter Hinsicht die einschlägigen mechanischen Gesetze zu berücksichtigen. Hier können allerdings nur die hauptsächlichsten der einschlägigen Begriffe aus der Festigkeitslehre in elementarer und möglichst kurz gehaltener Darstellung erläutert werden (Abschnitt II, S. 50).

Auf Grund der Kenntniss der allgemeinen Grenzen der Beanspruchung sowie der einschlägigen mechanischen Begriffe soll dann zunächst der Versuch angestellt werden, den mechanischen Sinn der allgemeinen Formeigenthümlichkeiten der Schienbeine, d. h. derjenigen Eigenthümlichkeiten, durch welche die Schienbeine gemeinsam vor den übrigen Skelettheilen, namentlich vor den übrigen langen Röhrenknochen, ausgezeichnet sind, nachzuweisen (Abschnitt III, S. 57).

Weitere Erörterungen sollen sich schliesslich darauf beziehen, wie die individuellen Verschiedenheiten der Schienbeinformen auf Schwankungen der Beanspruchung innerhalb ihrer gewöhnlichen Grenzen, sowie auf aussergewöhnliche Beanspruchungsverhältnisse zurückzuführen sind (Abschnitt IV, S. 86).

Nach dieser kurzen Darlegung des Weges, auf welchem der Nachweis der funktionellen Gestalt des Schienbeines versucht

werden soll, lasse ich die einzelnen Abschnitte unmittelbar einander folgen.

I.

Analyse der mechanischen Beanspruchung des Schienbeines.

Das in seinen Gelenken bewegliche Skelet einer unteren Extremität bildet einen zusammengesetzten Hebel. Die Kräfte, welche auf diesen einwirken, sind einerseits der Druck der Körperlast, andererseits der Zug der Muskel- und Bänderspannungen.

Die einwirkenden Kräfte sind, gemäss den gegebenen anatomischen Verhältnissen, alle mehr oder weniger schräg zur Längsaxe des Schienbeines gerichtet. Um die Art ihrer Einwirkung zu bestimmen, sind sie nach dem Parallelogrammgesetz zu zerlegen in Kräfte, welche in der Längsrichtung des Knochens wirken, und in solche, die senkrecht zu derselben gerichtet sind. Die ersteren rufen Druckbeanspruchungen, beziehungsweise, weil die Länge des Schienbeines die Ausdehnungen seines Querschnittes weit übertrifft, Beanspruchungen auf Strebefestigkeit hervor. Die senkrecht gerichteten Kräfte bewirken Schubspannungen und Biegungsbeanspruchungen.

Bezüglich dieser Biegungsbeanspruchungen lässt sich sofort hinzufügen, dass sie vorwiegend in einer ziemlich sagittal gestellten Ebene auftreten müssen. Es folgt dies aus dem Bewegungsmodus der Gelenke: Im Kniegelenk bewegt sich der Unterschenkel gegen den Oberschenkel um eine ziemlich genau frontal verlaufende Axe, und die Drehaxe des Sprunggelenkes ist nahezu frontal gestellt. Nur bei solcher Körperhaltung, bei welcher das aus dem Schwerpunkt des Körpers gefällte Loth durch das Sprunggelenk, beziehungsweise medianwärts von diesem zum Boden hinabzieht, treten, wie unten nachgewiesen werden wird, die sagittalen Biegungsbeanspruchungen zurück, gegenüber solchen, die in einer frontalen Ebene eine Biegung des Schienbeines erstreben.

Der Umstand, dass die Drehaxen der Gelenke nicht in eine

Ebene hineinfallen, dürfte veranlassen, dass auch Torsionsspannungen in dem Schienbein hervorgerufen werden.

Je nach der Gebrauchsweise des Gliedes, insbesondere auch je nach der Haltung, welche das Bein bei einer bestimmten Verwendung gerade einnimmt, muss die Beanspruchung des Schienbeines sich in verschiedener Weise aus den besprochenen Elementen zusammensetzen. Daher hat man, um genauere Aufschlüsse über die Gesammtbeanspruchungsweise eines Schienbeines, namentlich über Ansatz und Richtung der einwirkenden Biegungsgewalten zu gewinnen, die bei verschiedenen Haltungen erfolgenden Beanspruchungen nach einander zu analysiren.

Allerdings ist in Folge der grossen Zahl der angreifenden Muskeln und Bänder, namentlich auch in Folge der flächenhaften Ausbreitung der Ansatzstellen der ersteren, sodann wegen des Umstandes, dass das Schienbein selbst weder eine geradlinige Axe noch Gelenkflächen von einfacher mathematischer Gestalt besitzt, die Sachlage so komplicirt, dass eine genaue Ausführung der vorzunehmenden Analysen zu umständlich sein dürfte und wohl auch zu weitläufige und zu schwierige mechanische Entwickelungen erfordern würde. Aus diesen Rücksichten sollen die Verhältnisse schematisirt werden, insbesondere sollen mehrfach eine grosse Zahl einwirkender Muskel- und Bänderspannungen durch eine einzige Kraft, welche dann als die Resultirende jener aufzufassen ist, ersetzt werden — natürlich jedes Mal unter möglichster Berücksichtigung der vorliegenden anatomischen Einrichtungen.

Einer besonderen Rechtfertigung bedarf im Voraus vielleicht noch der Punkt, dass in den schematischen Entwürfen der Beanspruchungsverhältnisse des Schienbeines jedes Mal das Wadenbein ganz weggelassen sein wird. In dieser Beziehung sei daran erinnert, dass einerseits das Wadenbein nicht mithilft bei der Unterstützung der Körperlast, dass andererseits diejenigen Zugkräfte, welche hauptsächlich die Festigkeit des Schienbeines in Anspruch nehmen, durch Muskeln hervorgebracht werden, welche vom Oberschenkelbein oder dem Becken herkommen, beziehungsweise zum Fussskelet verlaufen. Nur im Falle der frontalen Biegung gewinnt, wie weiterhin gezeigt werden wird, das Wadenbein mit den daran ansetzenden Muskeln eine grössere Bedeutung, welcher dann bei der Bestimmung der resultirenden Kräfte Rechnung getragen werden soll.

Zur besonderen Untersuchung der dabei erfolgenden Beanspruchung des Schienbeines sind von den bei der gewöhnlichen

Verwendung der unteren Gliedmaassen immer wiederkehrenden Körperhaltungen drei ausgewählt, welche untereinander möglichst verschieden sind[1]).

1. Beanspruchung des Schienbeines beim Stehen auf einem, im Knie gestreckten Beine. — Hierzu Tafel I.

Bei der zu untersuchenden Körperhaltung trage das eine Bein, das andere sei vom Boden emporgehoben, die ganze Körperlast. Es sei im Knie völlig gestreckt; die Ferse berühre ohne Druck den Boden, indem die Schwerlinie des Körpers durch den Grosszehenballen des aufstehenden Fusses hinabziehe. — Es handelt sich also um eine Haltung, wie sie bei der Gehbewegung das sogenannte aktive Bein etwa in der von den Gebrüdern Weber[2]) als die zwölfte bezeichneten Phase einnimmt.

Bei dieser Stellung wird in Frontalprojektion die Schwerlinie des Körpers mit der Längsrichtung des Schienbeines ziemlich zusammenfallen. Die Resultante der Bänderspannungen, welche in frontaler Ebene dem Einknicken des Gliedes in seinen Gelenken entgegenwirken, muss in die gleiche Richtung fallen: d. h. in frontaler Richtung wird das Schienbein auf Biegung nicht beansprucht. — Anders dagegen gestalten sich die Verhältnisse in der Sagittalprojektion, in welcher die Schwerlinie (S), wie Fig. 1 zeigt, ausserhalb des Schienbeines ihren Verlauf nimmt. — Die hier auf das Schienbein zur Einwirkung gelangenden Kräfte sind in folgender Weise zu ermitteln.

Das Oberschenkelbein wird in seiner Lage erhalten, 1. durch das im Schwerpunkt angreifende Körpergewicht S, 2. durch den von dem Schienbein ausgeübten Gegendruck K, 3. durch die Resultirende O der in Betracht kommenden Zugkräfte[3]). Die letzteren werden hervorgebracht durch die stark

---

[1]) *Bei der Ausführung der folgenden Untersuchungen hat mich der Kandidat des Baufachs, Herr Hugo Stern in ausgezeichneter Weise unterstützt. Herr Stern hat auch die Abbildungen auf den Tafeln und ebenso (abgesehen von den Autotypiefiguren) diejenigen im Text entworfen.*

[2]) Wilh. u. Ed. Weber, Mechanik der menschlichen Gehwerkzeuge. Göttingen, 1836. Sonderheft der anatomischen Abbildungen, Taf. XIII, Fig. 10 (12).

[3]) Die Buchstaben S, K, O u. s. w. dienen der Einfachheit wegen zugleich zur Bezeichnung der Grösse der betreffenden Kräfte und zur Bezeichnung der Richtung derselben. So wird beispielsweise das eine Mal vom Körpergewicht S, das andere Mal von der Schwerlinie S die Rede sein.

angespannten hinteren Muskeln des Oberschenkels und durch einen Theil des Bandapparates des Kniegelenkes (das Ligam. popliteum und das Lig. cruciatum post.); die vorderen Muskeln des Oberschenkels entfalten keine nennenswerthe Zugwirkung, was an der leichten Verschieblichkeit der Kniescheibe zu erkennen ist. Die angeführten drei Kräfte müssen sich in einem Punkte schneiden, da dies Bedingung für drei sich das Gleichgewicht haltende Kräfte ist. Man findet diesen Punkt, nämlich a, als Schnittpunkt der Schwerlinie S mit der durch die anatomischen Verhältnisse gegebenen Richtung der Resultirenden O. Damit ist denn auch Angriffspunkt und Richtung des Druckes K bestimmt, da dieser wegen der Glattheit der Gelenkflächen senkrecht zu letzteren gerichtet sein muss.

Am Fussskelete halten sich das Gleichgewicht 1. der auf den vorderen, längeren Hebelarm wirkende Gegendruck (die Reaktion) des Bodens R, 2. die an dem hinteren, kürzeren Hebelarm angreifende, mächtige Wadenmuskulatur, deren Zugwirkung W in der Richtung der Achillessehne erfolgt, und 3. der Druck E seitens der distalen Gelenkfläche des Schienbeines. Diese drei Kräfte müssen sich wiederum in einem Punkte schneiden, welcher als Schnittpunkt b der Gegendrucklinie R mit der anatomisch bekannten Richtung des Sehnenzuges W bestimmt ist. Damit ist auch wieder Richtung und Angriffspunkt der dritten Kraft, des Druckes E, bekannt, indem man aus dem oben erwähnten Grunde nur eine Senkrechte aus Punkt b auf die Gelenkfläche des Sprungbeins zu fällen hat. (Senkrechte auf gekrümmte Flächen liegen in der Richtung des Krümmungsradius an der betreffenden Stelle.)

Auf das Schienbein selbst wirken die Reaktionen derjenigen Kräfte, welche vorhin als vom Schienbein auf Oberschenkelbein und Fussskelet einwirkend betrachtet worden sind, also diese Kräfte in gleicher Grösse, aber in umgekehrter Richtung, — nämlich 1. der Gegendruck K seitens der Oberschenkelkondylen, 2. die Resultirende O der eine Ueberstreckung des Kniegelenkes verhindernden Zugkräfte, 3. der Zug der Wadenmuskeln in der Richtung von W und 4. der Gegendruck E seitens des Sprungbeines. Jetzt ist festzustellen, welche Beanspruchungen die aufgezählten Kräfte in dem Schienbein hervorrufen[1]).

[1]) In den folgenden, kleiner gedruckten, rein mechanischen Entwickelungen gelangen eine grosse Reihe Begriffe und Methoden der Mechanik zur Anwendung, deren ausführliche Erklärung zu weit führen würde.

In Fig. 1 der Tafel I sind die Kräfte (durch rothe Linien) nach Ansatz und Richtung dargestellt. Die Wirkung einer Kraft ist jedoch erst völlig bestimmt, wenn ausser Ansatz und Richtung auch ihre Grösse bekannt ist. In dem vorliegenden Falle lässt sich die Grösse aller der in Betracht kommenden Kräfte bestimmen, wenn diejenige einer einzigen bekannt ist. Als bekannt darf man aber die Grösse des Körpergewichtes S bezeichnen. Nimmt man diese Kraft als 50 Kilogramm betragend an, setzt man also

$$S = 50 \text{ kg},$$

so ist in folgender Weise weiter zu verfahren.

In Fig. 2 wird zunächst die Kraft S nach Richtung und Grösse aufgetragen, wobei 1 kg = 1 mm gesetzt werden soll; sodann werden an die Enden dieser Strecke die Kräfte K und O in ihrer Richtung, d. h. unter den gleichen Winkeln, welche dieselben in der Fig. 1 mit der Schwerlinie bilden, angetragen. Durch das erhaltene Dreieck ist dann die Grösse der Kräfte K und O bestimmt; man misst die betreffenden Seiten des Dreiecks und setzt für 1 mm wieder 1 kg ein. (Diese Methode fusst unmittelbar auf dem Gesetz vom Parallelogramm der Kräfte.) — In Fig. 3 ist in der gleichen Weise die Grösse der am Fussskelet angreifenden Kräfte W und E ermittelt worden. Damit sind die Grössenwerthe aller 4 am Schienbein angreifenden Kräfte bestimmt:

$$K = 126{,}5 \text{ kg}; \quad O = 77 \text{ kg}; \quad W = 116 \text{ kg}; \quad E = 165 \text{ kg}.$$

In Fig. 4 ist die schon in Fig. 1 punktirt (- - -) eingezeichnete, der Einfachheit halber geradlinig angenommene Axe des Schienbeines mit den an ihr ansetzenden Hebelarmen der sie nicht schneidenden Kräfte O und E im selben Maassstabe (1 : 10) nochmals gezeichnet, und die vier angreifenden Kräfte sind nach Richtung und Grösse daran angebracht, wobei 3 kg = 1 mm gesetzt sind. Der Druck K wirkt in der Axe. Die übrigen drei Kräfte sind nach dem Parallelogrammgesetz durch Seitenkräfte in der Richtung der Axe und senkrecht dazu ersetzt; die ursprünglichen Kräfte sind deshalb nur punktirt gezeichnet. So sind beispielsweise die den Zug der Wadenmuskulatur W bedeutenden 116 kg durch die in der Richtung der Axe wirkende Seitenkraft von 115 kg und die senkrecht zur Axe gerichtete Seitenkraft 15,3 kg ersetzt. — Damit nun das Schienbein in seiner Lage bleibt (sich im Gleichgewicht befindet), muss jetzt erstens die Summe der in der Richtung der Axe nach oben wirkenden Kräfte gleich der Summe der in der Richtung der Axe nach unten wirkenden Kräfte sein, zweitens die Summe der senkrecht zur Axe nach links wirkenden Kräfte gleich der Summe der senkrecht zur Axe nach rechts wirkenden Kräfte sein, und drittens muss auch die Summe der links (entgegengesetzt dem Uhrzeiger) -drehenden Drehmomente gleich der Summe der rechts (im Sinne des Uhrzeigers) -drehenden sein. Diese Forderungen sind erfüllt:

1. Die Summe der in der Richtung der Axe nach oben wirkenden

Komponenten von O und E ist gleich der nach unten gerichteten Kraft K, vermehrt durch die gleichgerichtete axiale Komponente von W,

$$76{,}7 \text{ kg} + 164{,}8 \text{ kg} = 126{,}5 \text{ kg} + 115 \text{ kg}.$$

2. Die Summe der senkrecht zur Axe nach links gerichteten Komponenten von O und E ist gleich der senkrecht zur Axe nach rechts gerichteten Komponente von W,

$$7{,}2 \text{ kg} + 8{,}1 \text{ kg} = 15{,}3 \text{ kg}.$$

3. Das linksdrehende Moment 76,7 kg $\times$ 47,8 mm (gleich 3666,26 kgmm) ist gleich der Summe der rechtsdrehenden Momente 164,8 kg $\times$ 7 mm (gleich 1153,6 kgmm) und 15,3 kg $\times$ 164,2 mm (gleich 2512,26 kgmm),

$$3665{,}86 \text{ kgmm}^{1}) = 1153{,}6 \text{ kgmm} + 2512{,}26 \text{ kgmm}.$$

Das Bestehen des zweiten rechtsdrehenden Momentes hat man sich auf folgende Weise zu veranschaulichen: Die Gegenkraft von 15,3 kg der Kräfte von 8,1 kg und 7,2 kg hat im Abstande 185,8 mm vom Angriffspunkt der 8,1 kg anzugreifen, da sich die zugehörigen Abstände umgekehrt verhalten müssen, wie die einwirkenden Einzelkräfte. Man fügt daher an jenem Punkte die beiden sich aufhebenden, senkrecht zur Axe und einander entgegengesetzt gerichteten Kräfte von je 15,3 kg hinzu. Hiervon bildet dann die nach rechts gerichtete die Gegenkraft von den 8,1 kg und 7,2 kg, während die nach links gerichtete im Verein mit der ursprünglichen Kraft von 15,3 kg ein im Sinne des Uhrzeigers drehendes Kräftepaar vom Momente 15,3 kg $\times$ 164,2 mm bildet.

Durch die Kräfte nun, welche in der Richtung der Axe wirkend am Schienbein sich das Gleichgewicht halten, werden Beanspruchungen auf Druck- beziehungsweise auf Strebefestigkeit hervorgerufen; die senkrecht zur Axe gerichteten Kräfte bewirken Beanspruchungen auf Schubfestigkeit und dann auch, wie es ebenfalls durch die Drehmomente geschieht, Beanspruchungen auf Biegungsfestigkeit. — Die Art und Weise dieser Biegungsbeanspruchungen wird durch die folgenden Zeichnungen illustrirt.

In Fig. 5 wird die Grösse des an jeder Stelle der Axe wirkenden Biegungsmomentes durch die Länge der an dieser Stelle befindlichen Ordinate der Momentenfläche graphisch veranschaulicht, indem 1 Centimeter Ordinatenlänge einem Biegungsmoment von 2 Kilogrammmetern entspricht. Die in den Ansatzhebeln der die Axe nicht schneidenden Kräfte auftretenden Biegungsmomente sind auf gleiche Weise veranschaulicht.

Fig. 6 endlich zeigt in übertriebener Darstellung, welche Gestalt die Axe des Schienbeines und die Ansatzhebel hätten nach erfolgter Durchbiegung unter der Wirkung der gefundenen Biegungsmomente.

---

[1]) Die Differenz von 0,4 der Zahlen 3666,26 und 3665,86 rührt her aus den unvermeidlichen Zeichenfehlern des graphischen Verfahrens und muss mit Rücksicht auf den kleinen Maassstab der Zeichnung als eine sehr geringe bezeichnet werden.

Die vorstehende mechanische Entwicklung hat somit im Wesentlichen ergeben, dass das Schienbein in der gewählten Haltung ausser Strebe- und Schubbeanspruchungen eine Biegungsbeanspruchung erfährt, welche proximalwärts-wachsende Momente erzeugt, und welche bestrebt ist, den Knochen rückwärts auszubiegen, so also dass die konkave Seite des Bogens nach vorne zu liegen kommt.

2. Beanspruchung des Schienbeines beim Stehen auf einem, im Knie gebeugten Beine. — Hierzu Tafel II.

In diesem Falle soll die Beanspruchung des Schienbeines für eine Körperhaltung untersucht werden, bei welcher der Schwerpunkt des Körpers sich wieder senkrecht über dem Grosszehenballen des einen, die Körperlast allein unterstützenden Beines befindet, bei welcher aber das letztere nicht wie vorhin mit gestrecktem, sondern mit gebeugtem Knie dasteht. Die gewählte Haltung nähert sich mehr derjenigen in der von den Gebrüdern Weber[1]) als die vierte bezeichneten Phase der Gehbewegung.

Auch bei dieser Haltung fällt in der Frontalprojektion die Schwerlinie des Körpers mit der Schienbeinaxe zusammen, so dass in frontaler Ebene keine Biegungsbeanspruchung erfolgen kann. Wohl aber ist wieder eine solche für die sagittale Ebene zu erwarten; denn in der Sagittalprojektion kreuzt die Schwerlinie die Längsrichtung des Schienbeines (Fig. 1).

Die hier auf das Schienbein einwirkenden Kräfte sind in folgender Weise zu ermitteln.

An dem Oberschenkelbein halten sich das Gleichgewicht 1. das in der Richtung der Schwerlinie wirkende Körpergewicht S, 2. der Zug F der, diesmal kräftig kontrahirten, vorderen Oberschenkelmuskulatur, 3. die Resultirende D der von der Kniescheibe einerseits, von dem Schienbeine andererseits ausgeübten Druckkräfte P und Q. Der Schnittpunkt a dieser 3 Kräfte ist bestimmt als Kreuzungspunkt der Schwerlinie S mit der anatomisch bekannten Richtung des Muskelzuges F. Die Richtung der Resultirenden D, beziehungsweise die Lage des Punktes d ergiebt sich aus der Bestimmung der Richtung der Drucke P und Q. Die Richtung des Druckes P ist bekannt als die aus dem Punkte c auf die Gelenkfläche der Kniescheibe gefällte Senkrechte. Der

[1]) Wilh. u. Ed. Weber, a. a. O., Taf. XIII, Fig. 10 (4).

Punkt c nämlich ist gegeben als Schnittpunkt des Muskelzuges F und der Spannung des Ligamentum patellae T, derjenigen beiden Kräfte, welche an der Kniescheibe sich mit dem Gegendruck des Oberschenkels P das Gleichgewicht halten. Die Richtung des Druckes Q, der anderen Komponente der Resultirenden D, ist aus der Konfiguration der Gelenkfläche des Schienbeines zu bestimmen.

Am Fussskelete halten sich das Gleichgewicht 1. die vorne angreifende Reaktion des Bodens, R, 2. die am Fersenbein angreifende, in der Richtung der Achillessehne erfolgende Zugwirkung A der Wadenmuskulatur, und 3. der Druck des Schienbeines bei B. Der Schnittpunkt dieser drei Kräfte ist bestimmt als Kreuzungspunkt b der Schwerlinie S mit der Richtung der Achillessehne A. Die aus dem Punkte b auf die Gelenkfläche des Sprungbeines gefällte Senkrechte bezeichnet Ansatzpunkt und Richtung des Druckes B.

Die auf das Schienbein einwirkenden Kräfte sind jetzt 1. der Zug T des Kniescheibenbandes, 2. die Reaktion des Druckes Q an der proximalen Gelenkfläche des Schienbeines, 3. der Zug der Wadenmuskulatur, in der Richtung der Achillessehne A wirkend, und 4. die Reaktion des Druckes B an der distalen Gelenkfläche des Schienbeines. Es ist jetzt wieder festzustellen, in welcher Weise diese vier Kräfte das Schienbein beanspruchen [1]).

Um die Grösse der einzelnen Kräfte zu bestimmen, wird, das Körpergewicht wiederum als 50 kg betragend angenommen, in Fig. 2 zunächst aus den sich am Oberschenkelbein das Gleichgewicht haltenden Kräften S, D und F ein Dreieck gebildet, indem wieder zuerst die Kraft S nach Richtung und Grösse (3 kg = 1 mm) aufgetragen wird, und indem sodann an die Endpunkte dieser Strecke die Kräfte D und F in ihrer Richtung angetragen werden, bis dieselben sich schneiden. Damit ist die Grösse der Kräfte D und F bestimmt. Die Kraft F hält sich an der Kniescheibe im Punkte c mit den Kräften P und T das Gleichgewicht. Indem man nun an die Endpunkte der Strecke F die Kräfte P und T ihrer Richtung nach anträgt, erhält man ein zweites Dreieck, durch welches die Grösse der Kräfte P [2]) und T bestimmt

[1]) Vergl. oben die Anmerkung S. 36.

[2]) Unter den angenommenen Verhältnissen, bei Zugrundelegung eines Körpergewichtes von 50 kg und einer ruhigen Haltung des Körpers, besitzt in der untersuchten Stellung die die Kniescheibe treffende Druckwirkung P schon einen Werth von 288 kg. (Vergl. oben S. 29.)

wird. Ein drittes Dreieck ist noch zu konstruiren zur Bestimmung der Grösse von Q. Die Kraft Q hält sich im Punkte b mit den Kräften P und D das Gleichgewicht. Durch Verbindung des Endpunktes der Strecke P mit demjenigen der Strecke D erhält man also das dritte Dreieck, bzw. die Grösse der Kraft Q. — In Fig. 3 ist die Grösse der am Fussskelet angreifenden Kräfte A und B ermittelt. Somit sind jetzt alle die am Schienbein angreifenden Kräfte bestimmt, und zwar erhält man, wenn man die betreffenden Seiten der konstruirten Dreiecke misst und dann 1 mm = 3 kg setzt, für dieselben die folgenden Werthe:

$$T = 243 \text{ kg}; \quad Q = 284{,}2 \text{ kg}; \quad A = 91{,}5 \text{ kg}; \quad B = 130{,}5 \text{ kg}.$$

In Fig. 4 ist nun wieder die Schienbeinaxe mit den Hebelarmen der sie nicht schneidenden Kräfte T und Q im Maassstabe 1 : 10 hingezeichnet und die 4 angreifenden Kräfte nach Richtung und Grösse (3 kg = 1 mm) daran angebracht. Die schräg angreifenden Kräfte sind sodann durch ihre Seitenkräfte in der Richtung der Axe und senkrecht hierzu ersetzt, beispielsweise die Kraft A von 91,5 kg durch die in der Richtung der Axe wirkende Seitenkraft von 90,9 kg und durch die senkrechte Seitenkraft von 10,5 kg, oder die Kraft Q von 284,2 kg durch die parallel zur Axe gerichteten 281 kg und die senkrecht zur Axe wirkenden 42,2 kg. — Die Bedingungen für die Gleichgewichtslage des Schienbeines sind auch hier wieder erfüllt:

1. Die Summe der in der Richtung der Axe nach oben wirkenden Komponenten der Kräfte B und T ist gleich der Summe der nach unten wirkenden Komponenten der Kräfte A und Q,

$$129{,}1 \text{ kg} + 242{,}8 \text{ kg} = 90{,}9 \text{ kg} + 281 \text{ kg}.$$

2. Die, senkrecht zur Axe, nach links gerichtete Komponente der Kraft Q ist gleich der Summe der, senkrecht zur Axe, nach rechts gerichteten Komponenten der Kräfte A, B und T,

$$42{,}2 \text{ kg} = 10{,}5 \text{ kg} + 19{,}7 \text{ kg} + 12 \text{ kg}.$$

3. Das rechtsdrehende Moment 242,8 kg $\times$ 45 mm (gleich 10926,0 kgmm) ist gleich der Summe der linksdrehenden Momente 281 kg $\times$ 7,15 mm (gleich 1999,15 kgmm) und 42,2 kg $\times$ 211,3 mm (gleich 8916,86 kgmm),

$$10916{,}01 \text{ kgmm}^{1}) = 1999{,}15 \text{ kgmm} + 8916{,}86 \text{ kgmm}.$$

Das Bestehen des zweiten linksdrehenden Momentes hat man sich in ähnlicher Weise wie im früheren Falle zu veranschaulichen. Die Gegenkraft 42,2 kg der Kräfte 19,7 kg, 10,5 kg und 12 kg muss im Abstande 181,3 mm von der Kraft 12 kg angreifen. (Zuerst ist die Gegenkraft zweier Kräfte zu bestimmen und dann für diese Gegenkraft und die dritte Kraft die endgültige Gegenkraft.) Fügt man an diesem Punkte

---

[1]) Bezüglich der Differenz (10926,0 — 10916,01) kgmm = 9,99 kgmm vergleiche die Anmerkung S. 38.

die beiden sich aufhebenden, senkrecht zur Axe und einander entgegengesetzt gerichteten Kräfte von je 42,2 kg hinzu, so stellt hiervon die nach links gerichtete die Gegenkraft jener 3 nach rechts gerichteten Kräfte vor; die andere bildet im Verein mit der ursprünglichen Kraft von 42,2 kg das rechtsdrehende Kräftepaar vom Momente 42,2 kg $\times$ 211,3 mm.

Die in der Richtung der Axe wirkenden Kräfte erzeugen nun wieder Druck- beziehungsweise Strebebeanspruchungen; Schubbeanspruchungen werden durch die quergerichteten Kräfte hervorgebracht, durch die letzteren sowie durch die Drehmomente auch wieder Biegungsbeanspruchungen.

Von den Figuren 5 und 6 ist ziemlich dasselbe zu sagen, wie in dem vorigen Falle: In Fig. 5 wird wieder die Grösse des an jeder Stelle der Axe bzw. jener Ansatzhebel wirkenden Biegungsmomentes durch die Länge der an dieser Stelle befindlichen Ordinate der Momentenfläche — unter Anwendung des früheren Maassstabes — veranschaulicht. Und die Fig. 6 zeigt wieder in übertriebener Darstellung, welche Gestalt die Axe des Schienbeines und die Ansatzhebel annehmen nach erfolgter Durchbiegung unter der Wirkung der gefundenen Biegungsmomente.

Nach den vorstehenden Ermittelungen erfährt also das Schienbein auch in dieser Haltung mit gebeugtem Knie, ebenso wie in jener zuerst untersuchten Haltung, bei welcher das Bein sich in Streckstellung befindet, abgesehen von den Schub- und Strebebeanspruchungen, wiederum eine proximalwärts wachsende Biegungsbeanspruchung; aber während die zur Einwirkung gelangenden Kräfte in dem anderen Falle eine Ausbiegung nach hinten anstrebten, haben diese hier das Bestreben, das Schienbein im umgekehrten Sinne, nach vorne, durchzubiegen.

3. Beanspruchung des Schienbeines beim Stehen auf beiden, im Knie gestreckten Beinen. — Hierzu Tafel III.

Die Körperhaltung, für welche diesmal die Beanspruchung des Schienbeines ermittelt werden soll, entspricht ungefähr der von Braune und Fischer[1]) so bezeichneten Normalstellung. Die beiden, abweichend von dieser hier ein wenig gespreizt gestellten,

[1]) W. Braune u. O. Fischer, Ueber den Schwerpunkt des menschlichen Körpers mit Rücksicht auf die Ausrüstung der Infanterie. Abhandl. der math.-physik. Klasse der K. Sächsischen Gesellschaft der Wissenschaften, Bd. XV, Leipzig 1889.

im Knie durchgedrückten Beine sind gleichmässig durch das Körpergewicht belastet, und zwar ist bei jedem Fusse die Last gleichmässig auf den hinteren und die vorderen Stützpunkte vertheilt. Es trifft dann das aus dem Schwerpunkt des Körpers gefällte Loth die Bodenfläche unter der Mitte einer die beiden Sprunggelenke verbindenden Linie.

Bei einer solchen Stellung fällt die Schwerlinie, im Gegensatz zu den beiden vorher betrachteten Haltungen, nicht in der frontalen, sondern in der sagittalen Projektion mit der Längsaxe des Schienbeines zusammen. Daher muss hier auch nicht die sagittale, sondern die frontale Ebene diejenige sein, in welcher die einwirkenden Kräfte eine Biegungsbeanspruchung des Schienbeines hervorrufen. Um die Art und Weise der letzteren zu ermitteln, sind wieder die auf das Schienbein zur Einwirkung gelangenden Kräfte zu bestimmen. Hierbei sind in diesem Falle auch die auf das Becken einwirkenden Kräfte mitzubestimmen, weil die Schwerlinie nur mit diesem und nicht mit dem Extremitätenskelet selbst zusammentrifft.

An dem Becken halten sich das Gleichgewicht 1. das in der Richtung der Schwerlinie wirkende Körpergewicht S, 2. und 3. die Drücke H und H_1 von Seiten des rechten und des linken Schenkelkopfes, 4. und 5. die Resultirenden Z und Z_1 der jederseits in Betracht kommenden Muskel- und Bänderspannungen.

Von diesen fünf Kräften wirken die Reaktion 1. des Druckes H und 2. der resultirenden Zugkraft Z auf das rechte Oberschenkelbein, auf welches als 3. Kraft der Druck G von Seiten des Schienbeines einwirkt.

Für die Bestimmung der Beanspruchung des Schienbeines muss die Richtung der Kraft G bekannt sein. Diese ist auf Grund einer bestimmten anatomischen Thatsache als mit der Längsaxe des frontal projicirten Oberschenkelbeines zusammenfallend angenommen worden: Der Schaft eines Oberschenkelbeines zeigt gewöhnlich in Seitenansicht eine Ausbiegung nach vorne, dagegen in Vorderansicht einen geraden Verlauf[1]). Wie nun die Ausbiegung nach vorne darauf hindeutet, dass in sagittaler Ebene der Knochen auf Biegung nach vorne beansprucht wird, so geht aus dem Fehlen einer seitlichen Ausbiegung hervor, dass in frontaler Ebene in der Regel keine Biegungsbeanspruchung stattfindet. Damit dies der Fall sei, muss eben der Druck G, als die Resul-

[1]) Vergl. die Hauptfiguren der drei Tafeln.

tirende des über die Gelenkflächen der beiden Kondylen des Oberschenkelbeines vertheilten Druckes, in Bezug auf das frontal projicirte Oberschenkelbein eine axiale Richtung besitzen.

Die beiden anderen auf das Oberschenkelbein einwirkenden Kräfte, der Druck H und der Zug Z, müssen sich, damit Gleichgewicht vorhanden sei, mit der Kraft G in einem Punkte schneiden. Dieser Punkt b muss also in der Richtung der Kraft G liegen, — ob etwas mehr proximalwärts oder distalwärts, ist für die Beanspruchung des Schienbeines belanglos. Die Richtung des Druckes H ist durch eine in der Mitte der Gelenkfläche des Femurkopfes auf diese errichtete Senkrechte anatomisch bestimmt. Der Punkt b ergiebt sich dann als Schnittpunkt der Kräfte G und H. Wären diese auf die beiden Gelenkenden erfolgenden Drücke allein wirksam, so würde das Oberschenkelbein nach der lateralen Seite hinausgedrängt. Dies wird verhindert durch eine grosse Zahl von Zugspannungen — hauptsächlich sind es Muskelspannung, weniger die Spannung der Gelenkbänder —, welche das Oberschenkelbein nach der entgegengesetzten Richtung, nach der medialen Seite hin fortzubewegen streben, solcherweise jenen nach aussen wirkenden Druckkräften das Gleichgewicht haltend. In Betracht kommen alle die einerseits an dem Becken, andererseits an dem Oberschenkelbein inserirenden Muskeln, die äusseren und inneren Hüftmuskeln und die medialen Muskeln des Oberschenkels, namentlich also die mächtig entwickelte Glutäalmuskulatur und die mächtige Gruppe der Adduktoren. Als die Resultirende aller dieser Zugspannungen ist die Kraft Z aufzufassen, deren Richtung durch die aus dem Schnittpunkte b der Druckkräfte G und H nach dem Becken hin gezogene Linie dargestellt ist.

Von den auf das Schienbein einwirkenden Kräften ist die 1., der auf die proximale Gelenkfläche erfolgende Druck G, nach Ansatz und Richtung bekannt; 2. kommt in Betracht der Gegendruck L seitens des Sprungbeines und 3. die Resultirende M einer Anzahl von Muskel- und Bänderspannungen. — Ansatz und Richtung des Druckes L ist wieder durch eine auf die betreffende Gelenkfläche, in deren Mitte, errichtete Senkrechte bestimmt. Die auf die beiden Gelenkenden einwirkenden Druckkräfte würden das Schienbein medialwärts fortdrängen. Dies wird verhindert durch die Spannung der Gelenkbänder und des zwischen Schienbein und Wadenbein befindlichen Bandapparates, sodann durch die Spannung der von dem lateralen Theile des Schienbeins entspringenden, nach dem Fussskelet verlaufenden Muskeln (Mm.

tibialis anticus, tib. posticus). Die Resultirende dieser Zugspannungen muss mit den Druckkräften G und L in dem Punkte c zusammentreffen und in entgegengesetzter Richtung, lateralwärts, verlaufen: Beide Bedingungen erfüllt die Kraft M.

Nun ist wieder in ähnlicher Weise wie in den früheren Fällen festzustellen, welche Beanspruchung das Schienbein durch die drei Kräfte G, L und M erfährt[1]).

Die fünf auf das Becken einwirkenden Kräfte lassen sich auf drei reduciren, indem man für H und Z auf der einen Seite, für H_1 und Z_1 auf der anderen Seite die Resultirende dieser Kräfte G und G_1 einsetzt. Als an dem Becken sich das Gleichgewicht haltend kann man somit auch die Kräfte S, G und G_1 bezeichnen, welche 3 Kräfte in a ihren gemeinsamen Schnittpunkt haben.

In Fig. 2 ist nun zunächst aus den drei Kräften S, G und G_1 in bekannter Weise ein Dreieck konstruirt und hierdurch die Grösse von G ermittelt. Durch Konstruktion des Dreiecks G, L, M ist darauf die Grösse der beiden anderen, auf das Schienbein einwirkenden Kräfte festgestellt. Die gefundenen Werthe sind:

$$G = 25{,}57 \text{ kg}; \quad L = 93{,}48 \text{ kg}; \quad M = 69{,}51 \text{ kg}.$$

Der übrige Theil von Fig. 2 ist für die weiteren Entwickelungen ohne Belang. Der ausführlichere Kräfteplan des Beckens dient nur zur besseren Einsicht in das Verhalten der Kräfte am Becken: die fünf Kräfte S, H, Z, Z_1, H_1 bilden einen „ununterbrochenen Umlauf", was Bedingung für die Gleichgewichtslage ist.

Die Fig. 3 zeigt die Axe des Schienbeines mit dem Hebelarm für die Kraft G, daran angebracht einmal die drei ursprünglichen Kräfte G, L und M (in durchbrochenen Linien), sodann deren Komponenten, parallel und senkrecht zur Schienbeinaxe. — Die Gleichgewichtsbedingungen sind auch hier wieder erfüllt:

1. die nach oben wirkende Komponente der Kraft L ist gleich der Summe der nach unten wirkenden Komponenten der Kräfte G und M,

$$93{,}25 \text{ kg} = 24{,}9 \text{ kg} + 68{,}35 \text{ kg}.$$

2. Die nach links wirkende Komponente von M ist gleich der Summe der nach rechts wirkenden Komponenten von G und L,

$$12{,}4 \text{ kg} = 5{,}8 \text{ kg} + 6{,}6 \text{ kg}.$$

3. Das rechtsdrehende Moment 24,9 kg $\times$ 6,5 mm und das linksdrehende Moment 12,4 kg $\times$ 13,06 mm heben sich gegeneinander auf;

$$161{,}85 \text{ kg mm} + 0{,}09 \text{ kg mm}^2) = 161{,}94 \text{ kg mm}.$$

---

[1]) Vergl. oben die Anmerkung S. 36.

[2]) Bezüglich der Differenz von 0,09 kg mm vergleiche wieder die Anmerkung S. 38.

Ueber das Zustandekommen des linksdrehenden Momentes ist Folgendes zu sagen: Die Gegenkraft 12,4 der Kräfte 6,6 kg und 5,8 kg muss im Abstande 189,44 mm von dem distalen Ende der Schienbeinaxe angreifen. Fügt man an der betreffenden Stelle die beiden sich aufhebenden Kräfte von je 12,4 kg ein, so stellt hiervon die nach links gerichtete die Gegenkraft jener beiden nach rechts gerichteten Kräfte von 6,6 kg und 5,8 kg dar; die andere, nach rechts gerichtete Kraft von 12,4 kg bildet im Verein mit der gleich grossen ursprünglichen Kraft das linksdrehende Moment 12,4 kg $\times$ 13,06 mm.

Die Fig. 4 veranschaulicht die Grösse der an den einzelnen Stellen der Schienbeinaxe und des Ansatzhebels der Kraft G auftretenden Biegungsmomente.

Die Fig. 5 zeigt wiederum in übertriebener Darstellung, welche Form die Schienbeinaxe unter der Wirkung der gefundenen Biegungsmomente annimmt.

Bei der zuletzt untersuchten Haltung des Körpers erfährt somit das Schienbein ausser Strebe- und Schubbeanspruchung eine Biegungsbeanspruchung, welche eine Ausbiegung desselben lateralwärts erstrebt. Die biegenden Kräfte bewirken das grösste Moment in der Mitte des Knochens; distalwärts nimmt das Moment zunächst rasch ab, bis es etwa noch die Hälfte seiner grössten Stärke besitzt, sodann weiterhin langsamer, um am distalen Ende bis auf Null herabzusinken; proximalwärts verkleinert sich das Moment gleichmässig und in geringerem Grade, sodass es am proximalen Ende des Schienbeines noch über die Hälfte seiner grössten Stärke besitzt.

Des Weiteren ist nun zu erwägen, ob die Kenntniss der Beanspruchung eines Schienbeines in den drei untersuchten Haltungen ausreicht, um bestimmte allgemeine Sätze über die Art und Weise der Beanspruchung des Schienbeines bei der gesammten physiologischen Verwendung der unteren Gliedmaassen aufstellen zu können.

Dass beim Gehen, beim Laufen u. s. w. die Körperlast in Bewegung ist, und dass hierbei die Muskeln sich stärker kontrahiren, diese Momente kommen nur für die Grösse der Beanspruchung, nicht aber für die Art und Weise derselben in Betracht. Ebenfalls nur die erstere wird durch den Umstand beeinflusst, dass bei jenen Bewegungen die Haltung der Gliedmaassen beständig sich ändert; hierdurch wird nur die Dauer der in den

einzelnen Phasen einer Bewegung obwaltenden Beanspruchung entsprechend verkürzt.

Für die Beurtheilung der Gesammtbeanspruchung eines Schienbeines ist natürlich vor Allem die Beanspruchung desselben bei denjenigen Haltungen der unteren Gliedmaassen, beziehungsweise in denjenigen Zeitpunkten der ausgeführten Bewegungen zu berücksichtigen, in welchen das eine Bein allein die ganze Körperlast zu tragen hat. Dies kann nur der Fall sein, wenn der Fusspunkt der Körperschwerlinie innerhalb des Bereiches der Unterstützungsfläche des gegen den Boden anstemmenden Beines liegt. Verläuft hierbei die Schwerlinie gerade durch das Sprunggelenk, so also, dass der hintere und die vorderen Stützpunkte des Fussgewölbes gleich stark gegen den Boden angedrückt werden, dann fällt, wenn zugleich das Bein in Streckstellung sich befindet, in Sagittalprojektion die Schwerlinie mit der Schienbeinaxe in deren ganzem Verlauf zusammen, in Frontalprojektion dagegen zieht die Schwerlinie medialwärts vom Kniegelenk hinab, um mit der Längsrichtung des Schienbeines in dessen distalem Theile oder erst im Sprunggelenk zusammenzutreffen. Hier liegen also ähnliche Verhältnisse vor wie in dem dritten der untersuchten Fälle: die einwirkenden Kräfte streben das Schienbein in frontaler Ebene und zwar lateralwärts auszubiegen. — Wenn sodann, indem die Körperlast immer mehr auf die vorderen Stützpunkte des Fussgewölbes (besonders auf den medialen) verlegt wird, der Fusspunkt der Schwerlinie weiter vorrückt, dann tritt in dem Augenblicke, wo letzterer vor das Sprunggelenk zu liegen kommt, fast augenblicklich an die Stelle der Biegung in frontaler Ebene die in der sagittalen. In dieser erfolgen, was noch besonders erwähnt werden muss, gewöhnlich weit stärkere Biegungsbeanspruchungen als in der frontalen Ebene; denn bei den Haltungen mit sagittaler Biegung haben die mächtig entwickelten Wadenmuskeln und die gleichfalls sehr kräftigen vorderen Oberschenkelmuskeln ihre starken Kraftwirkungen zu entfalten.

Auf Grund dieser Erwägungen komme ich zu dem Schluss, dass die Kenntniss der Beanspruchung bei den drei untersuchten Körperhaltungen in der That hinreicht, um bestimmte Sätze bezüglich der allgemeinen Grenzen der gewöhnlichen Beanspruchung des Schienbeines aufstellen zu können. —

In der gewöhnlichen Gesammtbeanspruchung des Schienbeines muss dann aber ein Punkt ganz besonders auffällig er-

scheinen, der nämlich, dass das Schienbein in sagittaler Ebene bald vorwärts, bald rückwärts eine Biegung erfährt, in frontaler Ebene dagegen konstant eine solche lateralwärts. Eben dieses Verhalten der Beanspruchung soll auch für den zu liefernden Nachweis der funktionellen Gestalt des Schienbeines von besonderer Bedeutung sein. Dass aber auch gerade in diesem Punkte die obigen Untersuchungen das Richtige festgestellt haben müssen, dafür liefert eine bestimmte pathologische Erfahrung den unzweideutigsten Beweis.

Wenn bei der Rhachitis die Widerstandsfähigkeit des Skeletes verringert ist, so gelangen bekanntlich mancherlei Deformitäten der Knochen zur Ausbildung. Gerade die Form des Schienbeines pflegt, wenn die erkrankten Kinder schon zu laufen begonnen haben, in der auffallendsten Weise verändert zu werden.

„Die gewöhnlichste Form des rhachitischen Unterschenkels ist die, bei welcher die Tibia eine ziemlich gleichmässige Verkrümmung mit der Konvexität nach aussen darbietet“[1]). Nur selten erfolgt eine Verkrümmung des Schienbeines nach innen, und gleichfalls nur selten eine solche nach vorne. Bei diesen selteneren Verkrümmungen handelt es sich zudem gewöhnlich nicht eigentlich um eine bogenförmige Ausbiegung, sondern mehr um eine winkelige Einknickung des Knochens.

Es müssen natürlich bestimmte Bedingungen gegeben sein, welche jedesmal die Verkrümmung in der einen oder in der anderen Richtung eintreten lassen.

Bezüglich der selteneren Fälle einer Ausbiegung des Schienbeines in sagittaler Richtung, nach vorne, möchte ich annehmen, dass es sich dort in der Regel um Kinder handelt, bei welchen die rhachitische Erkrankung erst eingesetzt hat, nachdem dieselben das Laufen schon ziemlich erlernt hatten, also etwa in den letzten Monaten des zweiten Lebensjahres oder noch später. Dass in der grossen Mehrzahl der Fälle eine Ausbiegung in frontaler Richtung, nach der lateralen Seite erfolgt, wäre dann darauf zurückzuführen, dass in diesen Fällen die Erkrankung schon vorgelegen hat vor Beginn oder ganz im Anfang des Laufenlernens. Diese Annahmen sind theoretisch insofern begründet, als bei den ersten Laufversuchen der Kinder die Biegungsbeanspruchung der

---

[1]) Fr. Koenig, Lehrbuch der speciellen Chirurgie. 6. Aufl. Berlin 1894, Bd. III, S. 655.

Schienbeine in sagittaler Ebene zurücktritt gegenüber derjenigen in der frontalen Richtung, während doch später gerade das Umgekehrte stattfindet, — ein abweichendes Verhalten, von welchem weiter unten noch ausführlicher die Rede sein wird [1]).

Der Grund dafür, dass die Ausbiegung in sagittaler Ebene gegebenenfalls gewöhnlich nach vorne erfolgt, ist darin zu suchen, dass in sagittaler Ebene nach jener Richtung hin stärkere Biegungsbestrebungen zur Einwirkung gelangen als nach der entgegengesetzten Richtung. Eine Biegung nach hinten findet, gemäss den obigen Untersuchungen, nur bei völlig gestrecktem Beine statt. Kinder aus den ersten Lebensjahren drücken aber gewiss nicht das Knie in dem Maasse durch, wie dies später zu geschehen pflegt.

Die seltenen Fälle sodann, in welchen die Verkrümmung des Schienbeines in frontaler Ebene medialwärts erfolgt, dürften in der Regel solche sein, wo die rhachitische Erkrankung so hochgradig gewesen ist, dass die Kinder, nicht im Stande auf ihren Beinchen zu stehen, auf diesen umhergerutscht sind. Zu dieser Annahme veranlassen mich gewisse theoretische Erwägungen und auch besonders der Umstand, dass ich zwar recht häufig rhachitische Kinder mit auswärts verbogenen Beinchen habe umherlaufen sehen, aber noch niemals ein solches mit einwärts verbogenen Beinchen. (Seit über zwei Jahren habe ich die Kinder ausdrücklich daraufhin beobachtet.)

Ob diese Vermuthungen betreffend die Entstehungsweise der selteneren Formen der rhachitischen Schienbeinverkrümmungen richtig sind, muss allerdings durch die Praxis noch weiter bestätigt werden. Auf jeden Fall aber kann die Bedeutung der Erfahrung, dass die rhachitischen Schienbeine mit so grosser Regelmässigkeit lateralwärts sich ausbiegen, nicht zweifelhaft sein. Diese Erfahrung ist geradezu als die experimentelle Bestätigung des oben ermittelten Verhaltens, dass ein Schienbein in frontaler Ebene gewöhnlich nur Biegung lateralwärts, keine medialwärts erfährt, anzusehen.

Die Analyse der mechanischen Beanspruchung des Schienbeines hat somit folgendes Ergebniss:

1. Das Schienbein wird auf zusammengesetzte Festigkeit beansprucht, nämlich zugleich auf

[1]) Vergl. unten S. 88, 89.

Druck-, beziehungsweise Strebefestigkeit, auf Torsionsfestigkeit, auf Schub- und Biegungsfestigkeit.

2. Die das Schienbein auf **Biegung** beanspruchenden Kräfte wirken in zwei sich kreuzenden Ebenen, in einer **frontalen** und in einer **nahezu sagittalen.**
3. Die **frontalen** Biegungsbeanspruchungen, die schwächeren, erstreben eine Ausbiegung des Schienbeines **konstant lateralwärts**; ihr Moment ist etwa in der **Mitte** des Schienbeines am grössten und wird nach den beiden Enden desselben hin fortgesetzt kleiner.
4. Die **sagittalen** Biegungsbeanspruchungen, die stärkeren, erstreben eine Ausbiegung des Schienbeines **abwechselnd nach vorne und nach hinten;** ihr Moment wächst in jedem Falle von dem distalen Ende des Schienbeines stetig bis in den **proximalen** Theil desselben.

II.

Einige Grundbegriffe aus der Lehre von der Biegungsfestigkeit[1]).

1. Das Widerstandsmoment.

Belastet man das freie Ende B eines in horizontaler Lage eingespannten Balkens A B (Fig. 1), so wird bei der erfolgenden Biegung der Balken oben konvex und unten konkav. Die auf der konvexen Seite liegenden Fasern erfahren eine Verlängerung, indem sie gedehnt werden, die auf der konkaven Seite liegenden Fasern erfahren eine Verkürzung, indem sie gedrückt werden.

---

[1]) Zu den folgenden Ausführungen wurden benutzt:

A. Ritter, Lehrbuch der technischen Mechanik, 6. Aufl., Leipzig 1892.

F. Reuleaux, Der Konstrukteur, 4. Aufl., Braunschweig 1882—1889; I. Abschnitt: Festigkeit der Materialien.

H. Müller, Elementares Handbuch der Festigkeitslehre, Berlin 1875.

R. Lauenstein, Die Festigkeitslehre. 2. Aufl., Stuttgart 1893.

Zwischen beiderlei Fasern muss eine Faserschicht gelegen sein, welche keine Veränderung ihrer Länge, also auch weder Druck noch Zug erfährt; dies ist die sogenannte neutrale Faserschicht.

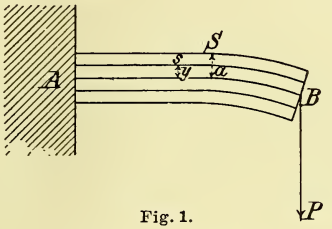


Fig. 1.

Die neutrale Schicht schneidet den Querschnitt des Balkens in einer geraden Linie (Fig. 2, N N), welche als die neutrale Axe des Querschnittes bezeichnet wird; dieselbe fällt zusammen mit der horizontalen Schwerlinie des Querschnittes. Die letztere theilt also den Querschnitt in zwei Theile, von denen in dem einen alle der Balkenlängsaxe parallelen Fasern auf Zug beansprucht werden (Zugseite des Querschnittes), während in dem anderen die Fasern auf Druck beansprucht werden (Druckseite des Querschnittes).

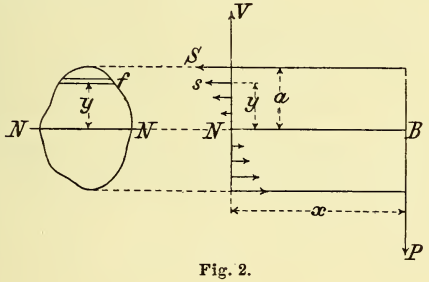


Fig. 2.

Die Spannung der einzelnen Fasern wächst proportional mit ihrer Entfernung von der neutralen Schicht, so dass die äusserste konvexe Faser die stärkst gezogene, die äusserste konkave die stärkst gedrückte Faser ist. Bezeichnet man mit s die Spannung der im Abstande y von der neutralen Schicht befindlichen Faser, mit S die Spannung der äussersten Faser mit dem Abstande a von der neutralen Schicht, so besteht die Gleichung

$$\frac{s}{S} = \frac{y}{a}.$$

In Bezug auf die neutrale Axe N N eines im Abstande x von dem Angriffspunkt der Last P befindlichen Querschnittes bildet die letztere (Fig. 2) das rechtsdrehende Moment $P x = M$ (Moment der äusseren Kraft oder Biegungsmoment). Damit Gleichgewicht vorhanden sei, muss dem Biegungsmoment ein gleich grosses Spannungsmoment entgegenwirken.

Denkt man sich die ganze Querschnittsfläche zerlegt in parallel zur neutralen Axe N N liegende sehr schmale Streifen, und ist f der Flächeninhalt eines solchen im Abstande y von der neutralen Axe gelegenen Streifens und s die in der Flächeneinheit auftretende Spannung, so bedeutet f s die Spannungswiderstände im ganzen Streifen, und das statische Moment der letzteren ist $= f s y$. Die Summe der statischen Momente der Spannungswiderstände aller Streifen des Querschnittes bezeichnet man abkürzungsweise mit $\Sigma (f s y)$. Dieses Gesammtmoment der inneren Spannungswiderstände muss also dieselbe Grösse besitzen wie das Biegungsmoment M, es muss sein:

$$M = \Sigma (f s y).$$

Setzt man hierin den aus der ersten Gleichung sich ergebenden Werth

$$s = S \frac{y}{a},$$

ein, so erhält man die Gleichung

$$M = \Sigma \left(f . S \frac{y}{a} . y \right).$$

Setzt man den konstanten Faktor S vor das Summenzeichen und den konstanten Divisor a unter den Faktor mit dem Summenzeichen, so erhält man

$$M = S . \frac{\Sigma (f y^2)}{a}.$$

Der Faktor S des Spannungsmomentes bedeutet den Antheil, welchen die Art des Materials an der Widerstandsfähigkeit des Querschnittes besitzt, der Faktor $\frac{\Sigma (f y^2)}{a}$ denjenigen der Menge und der Anordnung des Materials. Da die höchstzulässige Spannung (S) bei einem Körper von bestimmtem Material eine konstante Grösse darstellt, so ist bei gegebenem Material die Biegungsfestigkeit des Querschnittes allein abhängig von dem anderen Faktor des Spannungsmomentes, $\frac{\Sigma (f y^2)}{a}$. Diesen Aus-

druck nennt man daher das Widerstandsmoment des Querschnittes, W. Die allgemeine Formel des Widerstandsmomentes lautet somit:

$$W = \frac{\Sigma (f y^2)}{a}.$$

Das Widerstandsmoment eines Querschnittes wird also dargestellt durch die Summe der Produkte aus den einzelnen Flächentheilchen des Querschnittes und dem Quadrate ihres Abstandes von der neutralen Axe, $\Sigma (f y^2)$ — welchen Werth man das Trägheitsmoment des Querschnittes nennt —, diese Summe dividirt durch den Abstand a der äussersten Faser von der neutralen Axe.

Ein durch ein bestimmtes Biegungsmoment M beanspruchter Querschnitt ist, wie aus der vorletzten Gleichung hervorgeht, dann gegen Bruch gesichert, wenn sein Widerstandsmoment W mindestens so gross ist, dass die Spannung S der äussersten Faser die höchste zulässige Spannung des betreffenden Materials nicht überschreitet.

Die Grösse des Widerstandsmomentes ist, wie die allgemeine Formel für dasselbe darthut, durch die Grösse des Querschnittes und insbesondere auch durch dessen Form bedingt. Das Widerstandsmoment eines Querschnittes ist um so grösser, je weiter von der neutralen Axe entfernt möglichst viel Querschnittsfläche angeordnet ist.

Daher muss auch ein und derselbe Querschnitt, wofern er nicht kreisförmig ist, je nach der Richtung der biegenden Kraft ein verschiedenes Widerstandsmoment darbieten. (Die neutrale Axe steht ja jedesmal senkrecht auf der Biegungsrichtung, sie ändert also ihre Lage, wenn die Biegungsrichtung eine andere wird.) Ein rechteckiger Querschnitt beispielsweise bietet ein verschiedenes Widerstandsmoment, beziehungsweise eine verschiedene Biegungsfestigkeit dar, je nachdem ob der kürzere oder ob der längere Durchmesser in der Biegungsebene liegt. Die Tragfähigkeit eines Balkens, dessen Querschnitt ein Rechteck von den Seiten a und 2 a darstellt, ist eine doppelt so grosse, wenn jener auf einer der schmalen Seiten aufliegt, so dass die breitere Seite mit der Biegungsebene parallel steht, wie in dem umgekehrten Falle —, weil eben für den letzteren das Widerstandsmoment dieses Querschnittes nur ein halb so grosses ist.

2. Querschnitte von gleicher Festigkeit.

Bei eintretender Biegung entsteht, wie vorhin besprochen worden ist, auf der konvexen Seite des Balkens Zugspannung, auf der konkaven Seite Druckspannung, deren Werthe wachsen proportional mit der Entfernung der betreffenden Fasern von der durch den Schwerpunkt gehenden neutralen Axe des Querschnittes. Es entstehen also bei einem Querschnitte, dessen Schwerpunkt, beziehungsweise neutrale Axe in seiner Mitte liegt, in der äussersten gezogenen und der äussersten gedrückten Faser gleichzeitig Spannungen von derselben Grösse. Ein derartiger Querschnitt ist der zweckmässigste für ein Material, dessen höchste zulässige Zugspannung gleich seiner höchsten zulässigen Druckspannung ist, weil dabei das Material auf der Zug- und der Druckseite gleichmässig ausgenutzt wird.

Besitzt aber ein Material verschiedene Zug- und Druckfestigkeit, so würde ein solcher Querschnitt, mit der neutralen Axe in der Mitte, natürlich nicht zweckmässig sein: wegen der Ungleichheit der Festigkeitskoefficienten würde auf der einen Seite die höchste zulässige Spannung erreicht sein, während auf der anderen Seite die Festigkeit des Materials noch nicht völlig ausgenutzt wäre. Wählt man dagegen hier den Querschnitt so, dass diejenige der äusserst gespannten Fasern, für deren Spannung das Material den grösseren Festigkeitskoefficienten besitzt, auch in einem entsprechend grösseren Abstande von der neutralen Axe sich befindet, so wird wieder das Material auf beiden Seiten des Querschnittes gleichmässig ausgenutzt.

Im Sinne der günstigsten Materialverwendung müssen sich also in jedem Falle die Abstände der stärkst gezogenen und der stärkst gedrückten Faser von der neutralen Axe (a und a_1) verhalten wie die höchsten zulässigen Spannungen für Zug und Druck (S und S_1). Es muss die Gleichung zu Recht bestehen:

$$\frac{a}{a_1} = \frac{S}{S_1}.$$

Querschnitte, für welche dies zutrifft, heissen Querschnitte von gleicher Festigkeit.

Zwei der konstruktiven Technik entnommene Beispiele mögen das Besprochene erläutern. Schmiedeeisen besitzt für Zug und Druck dieselbe höchste zulässige Spannung ($S = S_1$). Daher wählt

man für schmiedeeiserne Träger als Querschnitt das sogenannte Doppel-T-Profil (Fig. 3), bei welchem $a = a_1$ ist, d. h. bei welchem die stärkst gezogene und die stärkst gedrückte Faserschicht gleich weit von der neutralen Axe entfernt liegen. Gusseisen besitzt für Druck eine doppelt so grosse höchste zulässige Spannung wie für Zug ($S_1 = 2\,S$). Für dieses Material wählt man ein einfaches T-Profil (Fig. 4) von solchen Abmessungen, dass die äusserste gedrückte Faserschicht sich in dem doppelten Abstande von der neutralen Axe befindet wie die äusserste gezogene Faserschicht, dass also $a_1 = 2\,a$ ist. — Das Doppel-T-Profil (Fig. 3) stellt also ein Profil von gleicher Festigkeit für Schmiedeeisen dar, das einfache T-Profil (Fig. 4) ein solches für Gusseisen.

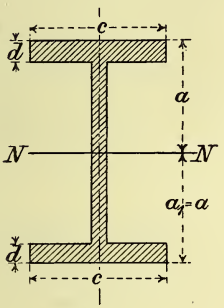


Fig. 3.

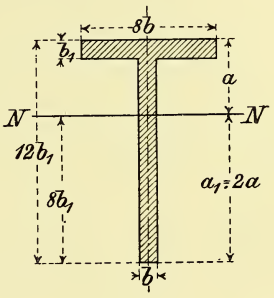


Fig. 4.

Bei einem gusseisernen Träger mit einem Profil von gleicher Festigkeit würde mithin bei genügend weit getriebener Belastung auf jeder Seite des Querschnittes die Spannung zu gleicher Zeit ihren höchsten zulässigen Werth erreichen —, vorausgesetzt, dass die biegende Kraft in solcher Richtung einwirkt, dass die äusserste Faserschicht mit dem kleineren Abstande a von der neutralen Axe die Zugbeanspruchung erfährt. Erfolgte nämlich die Ausbiegung im entgegengesetzten Sinne, derart also, dass die äusserste Faserschicht mit dem grösseren Abstande a_1 auf Zug beansprucht würde, so würde in dieser die höchste zulässige Spannung erreicht sein, wenn auf der anderen Seite in der, jetzt nur halb so weit von der neutralen Axe entfernten, stärkst gedrückten Faserschicht die Spannung die Hälfte des Werthes derjenigen auf der Zugseite, also erst den vierten Theil der höchsten zulässigen Druckspannung erreicht hätte. In dem letzteren Falle, bei der ungünstigeren Beanspruchung, würde die Tragfähigkeit des gusseisernen Trägers nur eine halb so grosse sein, wie in dem anderen Falle

weil dann in der von der neutralen Axe doppelt so weit entfernten stärkst gezogenen Faserschicht die höchste zulässige Spannung durch eine halb so grosse Belastung hervorgerufen würde. Die Verwendung eines Querschnittes von gleicher Festigkeit bei Materialien von verschieden grosser Zug- und Druckfestigkeit kann somit nur statthaben, wenn die Biegungsbeanspruchung in konstanter Richtung erfolgt.

3. Körper von gleicher Biegungsfestigkeit.

Das auf die einzelnen Querschnitte eines horizontal eingespannten, an seinem freien Ende belasteten Balkens wirkende Moment der äusseren Kraft, kurz das Biegungsmoment genannt, ist jedesmal gleich dem Produkt aus der Last und der Entfernung des betreffenden Querschnittes von dem Angriffspunkt der Last. Es sei diese Entfernung gleich x, die Grösse der Last gleich P, und das Biegungsmoment werde mit M bezeichnet; alsdann besteht die Gleichung:

$$M = x\,P.$$

Ein Querschnitt erfährt also eine um so grössere Beanspruchung, je weiter er von dem Angriffspunkt der Last entfernt liegt, so dass die Einspannungsstelle die stärkst beanspruchte ist.

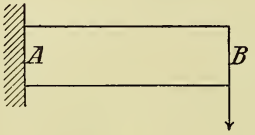


Fig. 5.

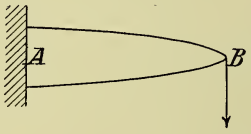


Fig. 6.

Besitzt nun ein Träger eine prismatische Gestalt (Fig. 5), mithin in allen Querschnitten das gleiche Widerstandsmoment, so muss bei genügend weit getriebener Belastung in der Einspannungsstelle als derjenigen Stelle, welche die stärkste Beanspruchung erfährt, ohne jedoch ein grösseres Widerstandsmoment als die übrigen Querschnitte zu besitzen, der Bruch erfolgen, ehe in den übrigen Querschnitten die Spannung ihre maximale Höhe erreicht hat. Bei einem solchen Träger mit sogenanntem gefährlichen Querschnitt (in Fig. 5 bei A) ist also das Material insofern unzweckmässig angeordnet, als in jenem einen Querschnitt der Bruch erfolgt, während die Festigkeit der anderen, je weiter sie von ihm entfernt liegen, um so weniger ausgenutzt ist.

Ein derartiger gefährlicher Querschnitt wird, im Sinne der günstigsten Materialverwendung, dann vermieden, wenn entsprechend der Zunahme der einwirkenden Biegungsmomente auch die Widerstandsmomente der einzelnen Querschnitte sich vergrössern (Fig. 6). Denn wie aus früheren Gleichungen hervorgeht, ist die Spannung in den äussersten Fasern irgend eines Querschnittes gleich dem Quotienten aus dem Biegungsmoment und dem Widerstandsmoment des betreffenden Querschnittes:

$$S = \frac{M}{W}.$$

Wenn so die Widerstandsmomente der einzelnen Querschnitte in dem gleichen Verhältnisse wachsen wie die Biegungsmomente, erhält der Quotient $\frac{M}{W}$, mithin auch die Spannung S der einzelnen Querschnitte, eine konstante Grösse, d. h. die Festigkeit des Materials wird in allen Querschnitten gleichmässig ausgenutzt. Einen Träger von solcher Beschaffenheit nennt man einen Körper von gleicher Biegungsfestigkeit.

III.

Erklärung der allgemeinen Formeigenthümlichkeiten des Schienbeines.

Auf die mechanische Bedeutung einer Eigenschaft, welche das Schienbein mit den anderen langen Röhrenknochen gemein hat, nämlich die hohle Beschaffenheit des Schaftes, ist bereits wiederholt aufmerksam gemacht worden. Schon Galilei[1]) hat erwähnt, dass bei den langen Knochen der Thiere und ebenso bei den röhrenförmigen Theilen pflanzlicher Organismen durch die hohle Form die Biegungs- und Bruchfestigkeit der betreffenden Gebilde ohne Gewichtsvermehrung bedeutend gesteigert werde. — Dass dies der Fall ist, hat gemäss den vorhin gegebenen mechanischen Erläuterungen seinen Grund darin, dass durch Anordnung

[1]) Galileo Galilei, Unterredungen etc. (1638), citirt nach A. Rauber, Lehrbuch der Anatomie. 4. Aufl. v. Quaint-Hoffmann's Anatomie. Leipzig 1892, Bd. I, S. 289.

des Materials möglichst weit von der Mitte das Widerstandsmoment der Querschnitte ein möglichst grosses wird.

Eine andere Eigenthümlichkeit der meisten Röhrenknochen

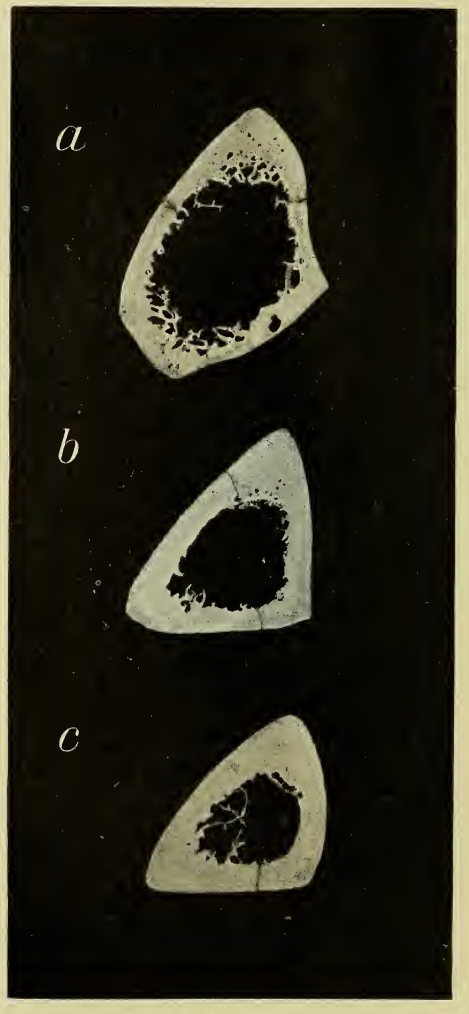


Fig. 7. Querschnitte eines gewöhnlichen (rechten) Schienbeines, a von der Grenze des oberen Drittels, b aus der Mitte, c von der Grenze des unteren Drittels[1]).

[1]) Die betreffenden Knochenquerscheiben sind mir in entgegenkommendster Weise in der Elfenbeinschneideanstalt des Herrn Theodor Francke, Berlin, Schmidstrasse 25, hergestellt worden.

und insbesondere des Schienbeines, die nach einem Ende hin erfolgende Umfangszunahme der betreffenden Knochen, hat Rauber[1]) mechanisch zu deuten versucht. Es scheint ihm nämlich darin eine Annäherung an Körper von gleicher Strebefestigkeit ausgedrückt zu sein, d. h. an Körper, welche, als Tragsäulen (in der Richtung ihrer Längsaxe) belastet, in jedem Querschnitt die gleiche Sicherheit gegen Einknickung darbieten. Zu dieser Erwägung Rauber's möchte ich bemerken, dass ich derselben insofern durchaus zustimme, als auch in den folgenden Ausführungen die Grössenzunahme der Schienbeinquerschnitte nach dem proximalen Ende hin dahin erklärt werden wird, dass solcherweise die Querschnitte des Knochens entsprechend der proximalwärts wachsenden Beanspruchung nach diesem Ende zu eine grössere Festigkeit erhalten. Andererseits muss ich jedoch betonen, dass es, wie gezeigt werden wird, nicht sowohl die Beanspruchung auf Strebefestigkeit, als vielmehr diejenige auf Biegungsfestigkeit ist, welche der betreffenden Eigenthümlichkeit des Knochens zu Grunde liegt.

Uebrigens sind die beiden besprochenen Punkte hier, wo speciell die Schienbeinform erklärt werden soll, insoweit von untergeordneter Bedeutung, als dieselben mehr allgemeine Merkmale aller, beziehungsweise der meisten, Röhrenknochen vorstellen und nicht besondere Merkmale des Schienbeines oder, genauer, des Schienbeinschaftes, welcher Theil des Knochens hier eigentlich immer nur gemeint ist.

Als besondere Eigenthümlichkeiten des Schienbeinschaftes kommen in Betracht

1. die ausgesprochen dreieckige Gestalt des Querschnittes in dem distalen Theile desselben, und
2. die proximalwärts hauptsächlich zu Gunsten des Tiefendurchmessers erfolgende Umfangszunahme des Querschnittes.

Der dreieckige Querschnitt des Schienbeines ist noch gewöhnlich dadurch ausgezeichnet, dass das Dreieck sich mehr oder weniger stark einem rechtwinkeligen nähert. Wie weit diese Annäherung gehen kann, zeigen die oben (Fig. 7) abgebildeten Quer-

---

[1]) A. Rauber, Ueber den mechanischen Werth einiger Querschnittsformen der Knochen. Sitzungsberichte der naturf. Gesellschaft zu Leipzig, 1875, S. 100. — Derselbe, Elasticität und Festigkeit der Knochen. Leipzig, 1876, S. 70.

schnitte von verschiedenen Stellen desselben Schienbeines. Bei dem Querschnitt von der Grenze des unteren Drittels des Schienbeines (Fig. 7, c) und noch mehr bei demjenigen aus der Mitte des Knochens (Fig. 7, b) verhält sich die nach vorne und medialwärts liegende Seite zu der lateralen und der hinteren Seite doch fast vollkommen so, wie die Hypotenuse eines rechtwinkeligen Dreiecks zu ihren beiden Katheten. Der dritte Querschnitt, der Grenze des oberen Drittels entstammend (Fig. 7, a), zeigt sodann, wie die Form des Schienbeinquerschnittes proximalwärts unregelmässiger wird und insbesondere auch, wie sich der Querschnitt hauptsächlich im Tiefendurchmesser vergrössert.

Diese besonderen Eigenthümlichkeiten der Schienbeinform können nun deshalb nicht zu der ja thatsächlich erfolgenden Strebebeanspruchung in Beziehung gebracht werden, weil für eine solche ein kreisringförmiger Querschnitt der zweckmässigste wäre. Das Gleiche gilt für die Beanspruchung auf Torsionsfestigkeit. Auch für die Beanspruchung auf Schubfestigkeit sind die fraglichen Formverhältnisse nicht erforderlich. Die Erklärung der Dreiecksform des Schienbeinquerschnittes sowohl, wie diejenige des proximalwärts erfolgenden Wachsthums des Tiefendurchmessers muss daher in der gegebenen Biegungsbeanspruchung gesucht werden.

Was zunächst den mechanischen Sinn der Dreiecksform des Schienbeinquerschnittes betrifft, so hat man sich des Umstandes zu erinnern, dass das Schienbein in einer frontalen und in einer ziemlich sagittal gestellten Ebene auf Biegung beansprucht wird. Für diese beiden Biegungsebenen muss daher die Biegungsfestigkeit des Knochens, beziehungsweise das Widerstandsmoment seiner Querschnitte einen möglichst grossen Werth besitzen, — einen grösseren als in den anderen Ebenen, in welchen bei der physiologischen Verwendung der Gliedmaassen keine Biegung erfolgt, wie beispielsweise in der schräg gestellten Ebene, welche den Schienbeinquerschnitt, etwa in einer von der lateralen Ecke nach der Mitte der gegenüberliegenden Seite verlaufenden Diagonale schneidet. Thatsächlich wird diese Bedingung durch die gegebene Form erfüllt. Denn wie der Balken mit rechteckigem Querschnitt eine grössere Tragfähigkeit besitzt, wenn er auf die hohe Kante gestellt ist, so muss auch die Festigkeit des Schienbeines bei Biegung in frontaler oder sagittaler Richtung eine grössere sein als bei Biegung in jener schrägen Richtung, über die vordere

mediale Fläche. Es hat somit die einem rechtwinkeligen Dreieck sich nähernde Form des Schienbeinquerschnittes den mechanischen Sinn, dass sie für die beiden Ebenen der physiologischen Biegung die grössten Widerstandsmomente darbietet.

Jedoch —, es muss zugegeben werden, dass der Querschnitt für einen solchen Zweck nicht nothwendig gerade diese Dreiecksform zu besitzen brauchte. Ein besonders grosses Widerstandsmoment für zwei sich etwa rechtwinkelig kreuzende Ebenen würde auch ein zweiaxig-symmetrischer Querschnitt darbieten, dessen Form beispielsweise der nachfolgenden Abbildung (Fig. 8) entsprechen könnte. Denn ein Körper mit solchem Querschnitt würde auch für Biegung in den beiden Ebenen aa und bb ein grösseres Widerstandsmoment besitzen als in den anderen Ebenen, z. B. der Ebene cc. Es muss daher noch ein weiterer Punkt in der Be-

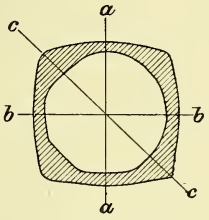


Fig. 8.

anspruchung des Schienbeines gegeben sein, welcher für die Erklärung der Dreiecksform seines Querschnittes mit von Belang ist.

In dieser Beziehung kommt nun der Umstand in Betracht, dass die einwirkenden Kräfte das Schienbein in der sagittalen Biegungsebene abwechselnd nach vorne und nach hinten, in der frontalen Ebene dagegen in der Regel ausschliesslich lateralwärts auszubiegen streben.

Da somit in frontaler Ebene die Biegung in konstanter Richtung erfolgt, ist die zweckmässigste Anordnung des Materials eine verschiedene, je nachdem ob das Material wie Schmiedeeisen eine gleiche Zug- und Druckfestigkeit, oder ob es wie Gusseisen ungleiche Festigkeitskoëfficienten besitzt (man erinnere sich dessen, was über „Querschnitte von gleicher Festigkeit“ mitgetheilt worden ist).

Hinsichtlich der Festigkeitsverhältnisse der Knochensubstanz, insbesondere der kompakten Substanz der Röhrenknochen, hat

nun Rauber[1]) durch sehr exakte Untersuchungen festgestellt, dass die Zugfestigkeit der Compacta immer erheblich geringer ist als ihre Druckfestigkeit. Das Verhältniss der beiden Festigkeitskoëfficienten zu einander stellt sich bei Knochen von Individuen mittleren Alters nahezu konstant annähernd wie 3 : 4. (Diesen Quotienten hat Rauber nicht selbst angegeben, aber derselbe lässt sich leicht aus den von ihm gefundenen Werthen berechnen.) Im höheren Alter wird, gemäss den Versuchsergebnissen Rauber's, das Verhältniss ein kleineres, indem die Zugfestigkeit der Knochen eine stärkere Abnahme erfährt als die Druckfestigkeit.

Die Festigkeitskoëfficienten der Knochensubstanz verhalten sich also ganz ähnlich wie diejenigen des Gusseisens: bei beiden Materialien besitzt die Zugfestigkeit einen geringeren Werth als die Druckfestigkeit. Wie daher beim Gusseisen, dessen Festigkeitskoëfficienten sich wie 1 : 2 verhalten, die zweckmässigsten Profile für in konstanter Richtung auf Biegung beanspruchte Träger solche sind, bei welchen die Abstände der äussersten Fasern von der neutralen Axe sich auch wie 1 : 2 verhalten, so ist für den Querschnitt des knöchernen Schienbeines, dessen Festigkeitskoëfficienten sich ziemlich wie 3 : 4 verhalten und dessen Beanspruchung in der frontalen Biegungsebene gleichfalls in konstanter Richtung geschieht, die zweckmässigste Form diejenige, bei welcher die Abstände der äussersten Fasern auf der lateralen Zug- und der medialen Druckseite von der für die frontale Biegung gegebenen neutralen Axe sich wiederum entsprechend verhalten, also auch ziemlich wie 3 : 4.

Diese zweite Bedingung ist es eben, welche die dreiecksähnliche Querschnittsform miterfüllt. Bei einem genau mathematischen Dreieck schneidet die der Grundlinie parallele Schwerlinie die Höhe in einem Punkte, der doppelt so weit von der Spitze des Dreiecks entfernt liegt wie von der Grundlinie. Der Schienbeinquerschnitt besitzt jedoch keine genau mathematische Dreiecksform, und die Lage des Schwerpunktes wird insbesondere durch die verschiedene Stärke der einzelnen Wandungsabschnitte modificirt. Da nun die Wandstärke an der medialen Kante des Schienbeines (S. 58 Fig. 7, a und b) grösser ist als diejenige der lateralen Seite, so wird dadurch der Schwerpunkt des Querschnittes, beziehungsweise die Lage der neutralen Axe für die Biegung in

[1]) A. Rauber, a. a. O. S. 33.

der frontalen Ebene in dem Sinne verschoben, dass sich ihr Abstand von der lateralen Seite vergrössert, derjenige von der medialen Kante verkleinert. Der Quotient dieser Abstände, welcher bei einem Querschnitt genau mathematischer Dreiecksform gleich 1 : 2 sein würde, erhält solcherweise einen grösseren Werth, so dass er als annähernd gleich 3 : 4 angenommen werden kann. In der sagittalen Ebene ist durch noch ausgiebigere Verstärkung der vorderen Kante gegenüber der hinteren Seite die Lage des Schwerpunktes so weit nach vorne verrückt, dass für Biegung in dieser Ebene die Abstände der stärkst beanspruchten Fasern beiderseits von der neutralen Axe mehr oder weniger genau die gleiche Grösse erhalten. Hier ist dies das Zweckmässigste, weil in der sagittalen Ebene Biegung nach vorne und nach hinten stattfindet.

Ich komme zu dem Schluss, dass von denjenigen Querschnittsformen, welche für die beiden Ebenen der physiologischen Biegung die grössten Widerstandsmomente darzubieten vermöchten, deshalb die dreiecksähnliche zur Verwendung gelangt ist, weil mit dieser Form der Schienbeinquerschnitt zugleich gegenüber den in der frontalen Ebene in konstanter Richtung einwirkenden Biegungskräften die Eigenschaften eines Querschnittes von gleicher Festigkeit besitzt.

Es steht nun noch aus die Erklärung jener zweiten Eigenthümlichkeit der Schienbeinform, der proximalwärts und zwar hauptsächlich zu Gunsten des Tiefendurchmessers erfolgenden Umfangszunahme des Schienbeinquerschnittes. Hierfür kommt in Betracht, was die Mechanik bezüglich der „Körper von gleicher Biegungsfestigkeit“ lehrt.

Die das Schienbein in frontaler Ebene auf Biegung beanspruchenden Kräfte rufen das grösste Moment etwa in der Mitte des Knochens hervor. Dem gegenüber hätte das Schienbein die zweckmässigste Form, wenn an der betreffenden Stelle sein Querschnitt das grösste Widerstandsmoment, beziehentlich den grössten Umfang besässe, und nach beiden Enden hin kleiner würde. Nun erfährt, wie des Weiteren die Analyse seiner Beanspruchung ergeben hat, das Schienbein auch, und sogar stärkere, sagittale Biegungsbeanspruchungen, deren Moment im distalen Theile des Schienbeinschaftes am kleinsten ist und von hier stetig, über die Mitte hinaus, bis in das proximale Ende des Knochens hineinwächst. Diese sagittalen Biegungsbeanspruchungen machen es

daher erforderlich, dass das Widerstandsmoment des Querschnittes für die sagittale Biegungsebene auch proximalwärts von der Schaftmitte noch weiter wächst bis hinein in die proximale Epiphyse. Dieser Forderung entspricht offenbar vollkommen die in Rede stehende Formeigenthümlichkeit des Schienbeines; insbesondere stimmt ja die Begünstigung des Tiefendurchmessers bei der Umfangszunahme der Querschnitte damit durchaus überein, dass auch gerade für die sagittale Biegungsebene das Widerstandsmoment der Querschnitte bis zum Ende des Knochens hin wachsen muss. Durch das solcherweise bedingte unverhältnissmässige Wachsen des Tiefendurchmessers in dem proximalen Theile des Schaftes erklärt es sich eben, dass hier das Schienbein die Dreiecksform seines Querschnittes mehr und mehr einbüsst.

Die mechanische Bedeutung der zweiten Eigenthümlichkeit der Schienbeinform besteht also darin, dass dieselbe dem Schienbein gegenüber der erfolgenden sagittalen Biegungsbeanspruchung die Eigenschaften eines Körpers von gleicher Biegungsfestigkeit verleiht.

Die Richtigkeit der obigen Erklärung der Dreiecksform des Schienbeinquerschnittes wird durch das Ergebniss angestellter Versuche bestätigt.

Was nämlich zunächst jenen Punkt betrifft, dass das Schienbein für Biegung in sagittaler und frontaler Ebene ein besonders grosses Widerstandsmoment besitzt, beziehungsweise dass der Schienbeinquerschnitt in den entsprechenden Durchmessern eine grössere Biegungsfestigkeit besitzt als in den anderen, so ist es schon durch Versuche von Messerer[1]) nachgewiesen worden, dass ein Schienbein bei Biegung über die vordere Kante, also in sagittaler Ebene, eine weit grössere Bruchlast erfordert, als bei Biegung über die mediale Fläche, d. h. in der schräg gestellten Ebene.

Was sodann den anderen Umstand anbelangt, dass der dreieckige Schienbeinquerschnitt gegenüber der frontalen Biegungsbeanspruchung ein solcher gleicher Festigkeit sein soll, so sind diesbezügliche Versuche von mir angestellt worden. Die letzteren waren um so nöthiger, als oben nur mehr schätzungsweise festgestellt, dass die Abstände der äussersten Fasern von der neutralen Axe das erforderliche Verhältniss darböten, dies aber nicht

[1]) O. Messerer, a. a. O., S. 92.

durch rechnerische oder experimentelle Ermittelung der Lage des Schwerpunktes in genauer Weise nachgewiesen worden ist.

Der gusseiserne T-Träger mit dem Querschnitt gleicher Festigkeit, bei welchem die Abstände der stärkst gezogenen und der stärkst gedrückten Faser sich verhalten wie 1 : 2, besitzt, wie schon wiederholt erwähnt, bei Biegung in verkehrter Richtung, d. h. in solcher Richtung, dass die äusserste Faserschicht mit dem grösseren Abstande von der neutralen Axe die Zugbeanspruchung erfährt, nur die Hälfte der Tragfähigkeit wie bei Biegung in der anderen Richtung. Ganz ebenso muss auch das Schienbein, wenn es gegenüber der frontalen Biegungsbeanspruchung einen Querschnitt gleicher Festigkeit besitzen soll, eine erheblich kleinere Bruchlast erfordern bei Ausbiegung medialwärts als bei solcher lateralwärts. Des Genaueren muss das Schienbein für diesen Fall, gemäss dem Verhalten der Festigkeitskoefficienten der Knochensubstanz, in ein und derselben frontalen Ebene bei Durchbiegung nach der medialen Seite nur annähernd drei Viertel der Festigkeit darbieten, wie bei Durchbiegung nach der lateralen Seite, im Sinne der physiologischen Beanspruchung.

IIIA.

Prüfung von Schienbeinen auf Biegungsfestigkeit[1]).

Die Versuche wurden angestellt in der mit der Königlichen technischen Hochschule zu Berlin verbundenen mechanisch-technischen Versuchsanstalt. Herrn Professor Martens, dem Vorsteher der genannten Anstalt, möchte ich auch an dieser Stelle meinen verbindlichsten Dank für sein freundliches Entgegenkommen aussprechen.

Das Material für die Versuche erhielt ich aus dem I. anatomischen Institut zu Berlin durch die Güte des Herrn Geheimer Medicinalrath Professor Dr. Waldeyer. Herrn Professor Dr. Hans Virchow spreche ich nochmals meinen ergebenen Dank aus für sein freundliches Eingehen auf meine Wünsche bei der Auswahl des Materials.

---

[1]) Die ersten Festigkeitsversuche an Knochen hat van Muschenbroek angestellt (1762); er hat verschiedene thierische Knochen auf ihre Zugfestigkeit geprüft. Eine grössere Zahl von Forschern, Wilson, Bewaw, Wertheim, C. O. Weber, H. Meyer, Rauber, Messerer und Charpy, hat späterhin an Knochen von Thieren und Menschen Prüfungen auch bezüglich der anderen Festigkeitsqualitäten, namentlich auch der Druckfestigkeit und der Biegungsfestigkeit, angestellt. Die werthvollsten Versuche sind diejenigen Rauber's: Dieser hat an Würfeln und Stäbchen von bestimmter Grösse die Koefficienten der verschiedenen Festigkeitsqualitäten des kompakten und des spongiösen Knochenmaterials in sehr genauer Weise festgestellt. Auf die betreffende Arbeit Rauber's, sowie auch auf diejenige Messerer's ist schon an früheren Stellen wiederholt Bezug genommen worden. Die Literatur der Festigkeitsversuche findet man ausführlich angegeben, z. B., in:

P. Bruns, Die Lehre von den Knochenbrüchen. Stuttgart, 1886. (Literatur zu Kap. VIII.) Deutsche Chirurgie von Billroth und Lücke, 27. Liefrg. (1).

Es sollte die Thatsache experimentell nachgewiesen werden, dass ein und derselbe Querschnitt eines bestimmten Schienbeines, wenn er durch eine in der frontalen Ebene des Knochens senkrecht zu dessen Längsaxe wirkende Kraft auf Biegung beansprucht wird, ein kleineres Biegungsmoment — und zwar ein annähernd drei Viertel so grosses — zum Bruch erfordert bei Wirkung der Kraft in der Richtung, dass die laterale Fläche des sich ausbiegenden Knochens die konkave Gestalt annimmt als bei umgekehrter Kraftrichtung.

Derselbe Querschnitt eines einzelnen Schienbeines konnte natürlich nicht zweimal auf seine Bruchfestigkeit geprüft werden. Zu den Versuchen mussten jedesmal ein Paar zusammengehöriger Schienbeine benutzt werden, von welchem dann der eine Knochen medialwärts, der andere lateralwärts gebogen wurde. Damit aus dem Ergebnisse eines solchen Doppelversuches ein richtiger Schluss bezüglich der Eigenschaften jedes einzelnen Knochens gezogen werden konnte, musste jedesmal festgestellt werden, ob die beiden Knochen im Ganzen und besonders in den zu prüfenden, einander entsprechenden Querschnitten von gleicher Stärke waren.

Zu diesem Zwecke wurde jedesmal zunächst das Gewicht der beiden Schienbeine bestimmt. Da fast durchweg frische Knochen geprüft wurden, so konnten geringe Gewichtsunterschiede, wie solche sich meistens ergaben, einfach auf eine ungleichmässige Entfernung der Weichtheile, insbesondere der an den Gelenkenden ansetzenden Bandmassen zu beziehen sein. Manche der geprüften Knochenpaare hatten einige Zeit im Wasser gelegen. Bei ihnen konnte eine Gewichtsdifferenz auch durch eine ungleiche Abgabe des aufgenommenen Wassers veranlasst sein. Aus solchen Rücksichten lieferte die Gewichtsbestimmung keinen ganz zuverlässigen Vergleichspunkt.

Sodann wurden die Knochen gemessen, und zwar einmal ihre Länge und sodann ihr Umfang an einander genau entsprechenden Stellen, und zwar gleich an denjenigen Querschnitten, welche nachher geprüft werden sollten. Die Messung der Länge (Fig. 9, L) wurde mit einem sogenannten Greifzirkel (ein Zirkel mit gekrümmten Schenkeln) jedesmal übereinstimmend in der Weise ausgeführt, dass die eine Spitze auf die Mitte der lateralen Gelenkfläche des proximalen Schienbeinendes, die andere auf die Mitte der Gelenkfläche des distalen Endes aufgesetzt wurde. Von dem letzteren Punkte aus wurde dann mit demselben Greifzirkel der Abstand (l) des zu prüfenden Querschnittes bestimmt; der

Umfang dieses Querschnittes wurde dann mit einem stählernen Bandmaasse gemessen. Für die Versuche war es von Wichtigkeit, nicht nur den Umfang, sondern auch den Tiefendurchmesser (t) und den Breitendurchmesser (b) der zu prüfenden Querschnitte eines jeden Schienbeinpaares zu vergleichen, nämlich wegen der Beziehungen dieser Dimensionen zum Widerstandsmoment der Querschnitte. Aus diesbezüglichen Messungen, welche an drei Schienbeinpaaren mittelst einer sogenannten Schubleere ausgeführt wurden, ergab sich, dass jene Maasse sich jedesmal ganz ebenso verhielten wie die Umfangszahlen, weshalb weiterhin nur die letzteren festgestellt wurden.

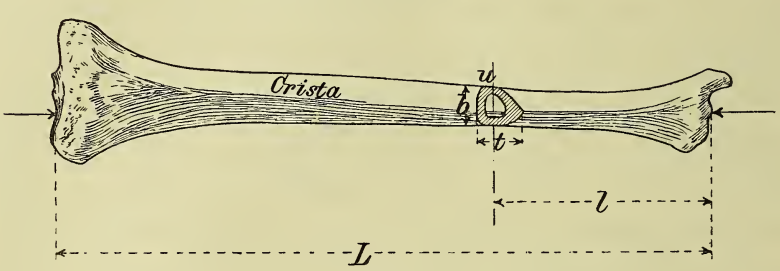


Fig. 9.

Zwei zusammengehörige frische Schienbeine von annähernd demselben Gewicht, von genau der gleichen Länge und dem gleichen Umfange an einander entsprechenden Stellen sind gewiss im Ganzen sowohl wie in den einander entsprechenden Querschnitten als gleich kräftig zu betrachten, — natürlich vorausgesetzt, dass keines der beiden Schienbeine irgend welche pathologische Veränderungen, insbesondere nicht Risse oder Scharten aufweist. Wenn jene Maasse nicht übereinstimmen, so ist natürlich der Knochen mit den kleineren Maassen als entsprechend schwächer zu betrachten.

Weiterhin galt es, die Richtung der frontalen Ebene, in welcher die Einwirkung der Biegungsgewalt nachher erfolgen sollte, für die beiden zu prüfenden Schienbeine in genau übereinstimmender Weise festzulegen. Zu dem Behufe wurden diese jedesmal mit dem mittleren Theile der lateralen Fläche ihres Schaftes auf einen niedrigen, parallelopipedisch zugeschnittenen Holzklotz neben einander aufgelegt; die mediale Kante beider Schienbeine war also nach oben gerichtet, und ihre Enden befanden sich, über dem niedrigen Holzblocke hervorragend, in

geringer Entfernung über der horizontalen Tischplatte. Wenn so die Knochen ganz symmetrisch nebeneinander lagen, so liess sich die Richtung jener frontalen Ebene, für beide übereinstimmend, mit einem eisernen Anschlagwinkel leicht bestimmen, indem der eine Schenkel des letzteren auf den Tisch aufgesetzt, der andere gegen die Gelenkfläche der Knochen angelegt und unter seiner Führung mit einem spitzen Messer eine Linie in den Gelenkknorpel eingeritzt wurde. Diese Linie bezeichnete dann den Schnitt der frontalen Ebene mit der Gelenkfläche.

Es waren nun des Weiteren die Versuche so einzurichten, dass die zusammengehörenden Schienbeine in einander genau entsprechenden Querschnitten die stärkste Beanspruchung erfuhren, und dass für den stärkst beanspruchten Querschnitt das Biegungsmoment beidemal einen gleich grossen Hebelarm erhielt.

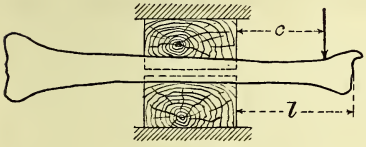


Fig. 10.

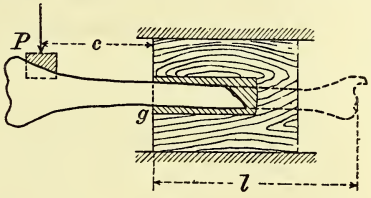


Fig. 11.

Bei einem Theile der Versuche wurde dies in der Weise erreicht, dass die Knochen bis zu den einander entsprechenden (im gleichen Abstande l von den distalen Gelenkflächen liegenden) Querschnitten zwischen zwei sorgfältig angepassten, zusammenschraubbaren Holzfuttern (Fig. 10) eingespannt und dann durch eine beidemal in der gleichen Entfernung (c) von den Einspannungsstellen einwirkende Kraft, — es war dies eine von oben her durch einen Keil aus hartem Holz auf den Knochen übertragene hydraulische Druckkraft — gebogen wurden. Bei dieser Anordnung gelangte jedesmal auf den zu prüfenden Querschnitt als auf die Einspannungsstelle eines frei tragenden Balkens das grösste Biegungsmoment zur Einwirkung.

In einigen Fällen, wo die grösseren Bruchstücke eines schon einmal geprüften Knochenpaares in einem neuen Querschnitt ein zweites Mal gebrochen werden sollten, wurde, weil hier eine möglichst feste Einspannung erforderlich war, der geringe Zwischenraum zwischen Knochen und Holzwandung noch mit Gips ausgegossen (in Fig. 11, g übertrieben dargestellt), und ferner wurde,

weil hier die Druckkraft auf die dünnwandige proximale Epiphyse zur Einwirkung kam, um ein Eingedrücktwerden der letzteren nach Möglichkeit zu verhindern, auf diese ein sich ihrer Form genau anschmiegender Bleisattel (P) aufgelegt.

Bei dem anderen Theile der Versuche wurde ein Holzbrett mit zwei in bestimmtem Abstande aufgenagelten, keilförmigen hölzernen Stützen verwandt (Fig. 12). Auf die beiden Holzschneiden, welche jedesmal so zurechtgefeilt worden waren, dass sie der Form der Knochen sich ziemlich anschmiegten — eine weitere Anpassung wurde meistens durch zwischengelegte Zinnfolie bewirkt —, wurden die Schienbeine so aufgelegt, dass beidemal der zu prüfende Querschnitt in den gleichen Entfernungen (a und b) von den Stützen zu liegen kam. Bei dieser Versuchsanordnung wurde dann der die Kraft übertragende Keil unmittelbar auf den zu prüfenden Querschnitt aufgesetzt, weil bei einem auf zwei Stützen liegenden und zwischen diesen durch

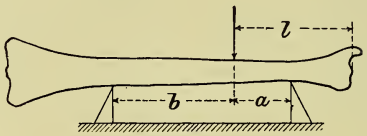


Fig. 12.

eine Einzelkraft belasteten Balken das grösste Biegungsmoment an der Einwirkungsstelle der Last auftritt.

Da nun die benutzte Kraft jedesmal senkrecht von oben her wirkte, so war es, damit sie zugleich in der frontalen Durchschnittsebene der Schienbeine wirkte, nur nöthig, die letzteren so einzuspannen, beziehungsweise aufzulegen, dass die zur Bezeichnung der frontalen Ebene auf die Gelenkflächen eingeritzten Linien auch ihrerseits genau senkrecht zu stehen kamen. Damit je zwei zusammengehörende Knochen in den entgegengesetzten Richtungen gebogen wurden, brauchte nur das eine Mal die mediale Kante, das andere Mal die laterale Fläche nach oben gelegt zu werden, — natürlich bei gleicher Versuchsanordnung. Denn bei Benutzung der erstbesprochenen Einspannvorrichtung (Figg. 10 und 11) wird bei erfolgender Biegung die nach oben blickende Seite des Knochens die konvexe oder die Zugseite, während bei der anderen Versuchsanordnung (Fig. 12) umgekehrt diese Seite die konkave oder die Druckseite wird.

Als Kraftquelle endlich wurde, wie schon angedeutet, eine

hydraulische Maschine, die Festigkeitsprüfungsmaschine System Pohlmeyer, benutzt. Dieselbe kann man sich einfach vorstellen als aus zwei horizontal gestellten eisernen Platten bestehend, einer festliegenden unteren Platte und einer beweglichen oberen Platte, welche durch die hydraulische Kraft mit allmählich zunehmendem Druck gegen die untere angepresst werden kann. Ein mit der Maschine verbundenes Zeigerwerk ermöglicht die Ablesung des in jedem Augenblick ausgeübten Druckes, und zwar mit 2 Kilogramm Genauigkeit. Durch ventilartige Vorrichtungen lässt sich die Schnelligkeit der Druckzunahme regulieren, die Maschine augenblicklich zum Stillstand bringen und auch die Belastung beliebig herabmindern.

Auf der unteren Platte dieser Maschine wurden nun die bei der einen Versuchsanordnung gebrauchten Holzfutter mit den darin eingespannten Schienbeinen festgeschraubt, die andere Vorrichtung brauchte nur lose aufgesetzt zu werden. Sodann wurde die obere Platte soweit herabgelassen, bis sie den die Druckkraft auf den Knochen übertragenden Keil, welcher bis dahin mit einer Hand an seiner Stelle festgehalten worden war, erfasst hatte und denselben mit einem geringen Gewicht, etwa von 10 kg, gegen den Knochen andrückte. Nachdem dann die Lage des Schienbeines noch einmal kontrolirt worden war, wurde die Maschine wieder in Gang gesetzt. Sodann wurde der vorrückende Zeiger scharf beobachtet, weil dieser sofort nach erfolgtem Bruch des Knochens in die Nullstellung zurückschnellt.

In der folgenden Tabelle nun findet man die erforderlich gewesenen Bruchlasten mit den übrigen wichtigen Daten der einzelnen Versuche zusammengestellt. Vorausschickend möchte ich nur noch bemerken, dass in dieser Tabelle, sowie in der sich daran anschliessenden Besprechung der Versuchsergebnisse für den Fall, dass ein Schienbein nach der lateralen Seite hin ausgebogen wird, so also, dass die laterale Fläche die konvexe und die mediale Kante die konkave Gestalt erhält, gewöhnlich kurz von der Biegung des Schienbeines über die mediale Kante (m. K.) gesprochen wird, und dementsprechend bei Ausbiegung des Schienbeines medialwärts von der Biegung über die laterale Fläche (l. F.). — Die sonst noch in der Tabelle vorkommenden Buchstaben (L, a, b, c) besitzen dort dieselbe Bedeutung wie in den voraufgegangenen Abbildungen (Figg. 9—12).

Nummer des Versuchs	Zeichen des Schienbeines	des Schienbeines		des gepr. Querschnitts		Biegungsrichtung über die
		Gewicht in kg	Länge in mm	Abstand von der dist. Gelenkfläche mm	Umfang mm	
1	1 r.	129,9	346	117	59,7	m. K.
	1 l.	126,2	342		59,5	l. F.
2	2 r.	356,5	330	110	69,6	m. K.
	2 l.	360,5	337		70,0	l. F.
3	3 r.	377	373	116	66,1	m. K.
	3 l.	387	373		68,1	l. F.
4	3 r.	wie vorher		186,5	·	m. K.
	3 l.				·	l. F.
5	4 r.	270	327	121	71,1	l. F.
	4 l.	257	327		71,3	m. K.
6	4 r.	wie vorher		192	·	l. F.
	4 l.				·	m. K.
7	5 r.	494	375	125	80	l. F.
	5 l.	490	375		79	m. K.
8	5 r.	wie vorher		200	·	l. F.
	5 l.				·	m. K.

Stützweiten a mm	Stützweiten b mm	Hebelarm c mm	Bruchlast kg	Index des Verhältnisses der beiden Bruchlasten	Bemerkungen
—	—	80	129 / 106	82,1	Einziges Paar macerirter Knochen.
50	100	—	440 / 380	86,3	
75	75	—	340 / 240	70,6	Schienbeine eines 70jährigen Mannes.
—	—	125	[131] / 122	[91,6]	Absprengung der Epiphyse des rechten Schienbeines.
75	75	—	335 / 422	79,3	
—	—	80,5	197 / 215	91,6	
75	75	—	527 / 585	90,0	
—	—	107	180 / 230	78,2	

Nummer des Versuchs	Zeichen des Schienbeines	des Schienbeines		des gepr. Querschnitts		Biegungsrichtung über die
		Gewicht in kg	Länge in mm	Abstand von der dist. Gelenkfläche mm	Umfang mm	
9	6 r.	321	321	119	70	l. F.
	6 l.	241	322,5		70	m. K.
10	6 r.	wie vorher		182	81	l. F.
	6 l.				79	m. K.
11	7 r.	505	361	$\frac{L}{2}$	96,5	l. F.
	7 l.	472	356,5		92,0	m. K.
12	7 r.	wie vorher		226	85,5	l. F.
	7 l.			229,5	83,0	m. K.
13	8 r.	509	380,5	$\frac{L}{2}$	86,0	l. F.
	8 l.	503,5	377		85,5	m. K.
14	9 r.	305	316	$\frac{L}{2}$	76	l. F.
	9 l.	304,5	313		76	m. K.
15	10 r.	515	382,5	140	80,5	l. F.
	10 l.	525	376,3		78,5	m. K.
16	10 r.	wie vorher		205	90	l. F.
	10 l.				88	m. K.

Stützweiten a mm	Stützweiten b mm	Hebelarm c mm	Bruchlast kg	Index des Verhältnisses der beiden Bruchlasten	Bemerkungen
75	75	—	267 / 360	74,1	Linkes Schienbein mit lädirter Epiphyse.
—	—	100	[150] / .	.	Eindrückung der Epiphyse des r. Sch. durch 150 kg Belastung.
115	85	—	500 / 527	94,8	Rechtes Schienbein auffallend stärker als linkes.
—	—	75	282 / [300]	[94,0]	Lockerung der Einspannung d. l. Sch. bei Einwirkung von 300 kg.
110	90	—	515 / 496	104,0	Schienbeine von abnormer Form.
75	75	—	297 / 348	85,3	
75	75	—	500 / 660	75,7	
—	—	85	296 / 276	107,2	Ungenaue Einspannung der beiden Schienbeine.

Mit 10 Schienbeinpaaren sind somit 16 Doppelversuche angestellt worden, indem 6 dieser Schienbeinpaare nacheinander an zwei verschiedenen Stellen geprüft wurden. Da der Bruch von je zwei zusammengehörigen Schienbeinen immer mit gleichen Hebelarmen, beziehungsweise mit gleichen Stützweiten geschehen ist, so brauchen nicht erst die Biegungsmomente, welche beidemal den Bruch herbeiführten, berechnet zu werden, sondern es können statt der Biegungsmomente, welche ja das Produkt aus Kraft und Hebelarm sind, bei der Gleichheit der Hebelarme ohne Weiteres die ermittelten Bruchlasten verglichen werden[1]).

Die Zahlen in der vorletzten Rubrik der Tabelle geben an, wie viel Kilogramm Bruchlast für das über die laterale Fläche gebrochene Schienbein auf je 100 Kilogramm der Bruchlast, welche das zugehörige über die mediale Kante gebrochene Schienbein erforderte, entfallen. Die betreffenden Zahlen, welche also die Indexe des Verhältnisses der beiden bei den einzelnen Schienbeinpaaren erforderlich gewesenen Bruchlasten darstellen, findet man einfach in der Weise, dass man den Quotienten aus der Bruchlast des über die laterale Fläche gebrochenen Schienbeines und derjenigen des über die mediale Kante gebrochenen mit der Zahl 100 multiplicirt.

Ein Versuch, der 10., ist ohne Ergebniss geblieben, weil schon gleich bei Biegung des einen Schienbeines über die laterale Fläche durch die an der proximalen Epiphyse angreifende Belastung die letztere eingedrückt und dann abgesprengt wurde, bevor der Bruch an der Einspannungsstelle erfolgte. Von den übrigen 15 Versuchen stimmen 13 in ihrem Ergebniss insofern überein, als bei allen das über die laterale Fläche gebogene Schienbein eine geringere Bruchlast erfordert hat, als das über die mediale Kante gebrochene, so dass die Indexzahlen dieser Versuche alle unter 100 liegen. Andererseits zeigt jedoch der

---

[1]) Die Biegungsmomente wären zu berechnen, wenn man das Biegungsmoment = M und die Bruchlast = P setzt, bei Benutzung der einen Versuchsanordnung (Fig. 10, bezw. 11) nach der Formel:

$$M = P \cdot c,$$

bei der anderen Versuchsanordnung (Fig. 12) nach der Formel:

$$M = P \frac{a\,b}{a + b}.$$

Diese Formeln erklären die auffälligen Unterschiede der Bruchlasten bei Benutzung der verschiedenen Vorrichtungen.

Werth der letzteren erhebliche Schwankungen, und es fragt sich daher zunächst, wie diese Schwankungen der Indexe der einzelnen Versuchsergebnisse zu erklären sind.

Hierfür ist nun vor Allem die verschiedene Lage der geprüften Querschnitte verantwortlich zu machen. Manche Schienbeinpaare sind in der Nähe der Grenze des unteren Drittels geprüft worden, andere in der Mitte der Knochen, wieder andere an noch weiter proximalwärts gelegenen Stellen. Weshalb die Lage des Querschnittes einen grossen Einfluss auf das Versuchsergebniss besitzen muss, soll hier nicht erörtert werden; es geht dies aus dem Inhalte früherer Erörterungen hervor, und an einer späteren Stelle[1]) wird noch weiter davon die Rede sein. Hier sei nur darauf hingewiesen, dass die Versuche No. 3, 5, 9 und 15 mit den kleinen Indexzahlen 70,6, 79,3, 74,1 und 75,7 solche sind, bei welchen ein Querschnitt in der Nähe der Grenze des unteren Drittels geprüft worden ist. Bei Versuch No. 3 liegt die geprüfte Stelle 8 mm unterhalb, bei den drei anderen, übereinstimmend, ziemlich 1 cm oberhalb der Grenze des unteren Drittels der Schienbeine. Nur ein Versuch mit kleinerem Index, derjenige No. 8 mit dem Index 78,2, bezieht sich auf eine höhere Stelle, auf einen etwa 1 cm proximalwärts von der Mitte gelegenen Querschnitt. — Beiläufig sei hier zu Versuch No. 9 noch erwähnt, dass dem erheblichen Gewichtsunterschiede der Knochen, wie er in der Tabelle verzeichnet ist, keineswegs ein gleich erheblicher Unterschied in der Stärke der Knochen zu Grunde gelegen hat. Das Knochenpaar hatte die Nacht über in Wasser gelegen. Da nun eine Epiphyse des linken Knochens bei der Entfernung der Weichtheile angeschnitten worden war, so war in Folge dessen aus diesem Knochen das aufgenommene Wasser in grösserer Menge ausgeflossen.

Weiterhin ist dann die relative Stärke der zu einem Paar gehörigen Schienbeine zu beachten. Denn ein Versuch, bei welchem die beiden Knochen genau die gleiche Stärke besitzen, muss ein anderes Ergebniss haben als ein solcher mit einem Paar in ihrer Stärke mehr oder weniger verschiedener Schienbeine, wenn auch in beiden Versuchen die gleiche Stelle geprüft wird. Würde von den beiden ungleich starken Schienbeinen das schwächere über die laterale Fläche gebrochen, so müsste natürlich dieser Versuch einen kleineren Index ergeben,

[1]) Vergl. unten S. 84, 85.

und im umgekehrten Falle müsste der letztere einen grösseren Werth erhalten. Bei den angestellten Versuchen ist jedesmal, wenn zusammengehörige Schienbeine in ihrer Stärke nicht genau übereinstimmten, das stärkere Schienbein über die laterale Fläche gebrochen worden, damit nicht die sich bei dieser Biegungsrichtung ergebende geringere Bruchlast, wie es bei Biegung des schwächeren Knochens über die laterale Fläche möglich gewesen wäre, auf die geringere Stärke des Knochens bezogen werden konnte. Von den geprüften Schienbeinen zeigten, wie aus den mitgetheilten Maassen ersichtlich ist, diejenigen des 11. Paares den grössten Unterschied in ihrer Stärke. Bei ihnen war dieser so erheblich, dass er schon bei der blossen Betrachtung der Knochen aufgefallen war. Als dann das rechte Schienbein, dessen Querschnitt einen etwa 5% grösseren Umfang besass, über die laterale Fläche gebrochen wurde, reichte hierzu trotzdem ein geringeres Gewicht aus, als zum Bruch des schwächeren linken Schienbeines über die mediale Kante erforderlich war. Dass der betreffende Index einen ziemlich grossen Werth darbietet, erklärt sich somit in diesem Falle nicht nur daraus, dass die geprüfte Stelle in der Mitte der Knochen und nicht in der Nähe der Grenze ihres unteren Drittels gelegen ist, sondern zudem auch noch aus der verschiedenen Stärke der beiden Knochen.

An dritter Stelle hat man sich zur Erklärung jener Schwankungen der Indexwerthe des Umstandes zu erinnern, dass gemäss den Feststellungen Rauber's[1]) im höheren Lebensalter die Zugfestigkeit der Knochen in erheblicherem Maasse abnimmt als ihre Druckfestigkeit, sodass dann das Verhältniss der beiden Festigkeitskoefficienten ein kleineres wird. In Uebereinstimmung hiermit hat der Versuch No. 3, bei welchem es sich um die Schienbeine eines siebzigjährigen Mannes handelt, einen auffallend kleinen Index, nämlich den von 70,6 ergeben. Der Einfluss des Alters auf das Verhältniss der Festigkeitskoefficienten ist wohl darauf zurückzuführen, dass der Ernährungszustand sämmtlicher Gewebe im Alter ein anderer wird. Daher liegt die Vermuthung nahe, dass auch bei gleichalterigen Individuen jenes Verhältniss bemerkenswerthe Unterschiede darbiete, wofern dieselben in ihrem allgemeinen Ernährungszustande wesentlich von einander abweichen. Hierauf bezügliche Daten hätten deshalb, was ich besonders für etwaige ähnliche zukünftige Untersuchun-

[1]) Vergl. oben S. 62.

gen hervorgehoben haben möchte, in die Tabelle mit aufgenommen werden können. Bei den angestellten Versuchen ist dies im Allgemeinen nicht geschehen, weil eben mit den letzteren zunächst nur zu beweisen beabsichtigt wurde, dass die beiden Schienbeine ein und desselben Individuums, unter gleichen Bedingungen in den beiden entgegengesetzten Richtungen gebrochen, verschiedene Bruchlasten ergäben. In dem fraglichen Falle ist das Alter des Individuums, von welchem die Knochen stammen, deshalb vermerkt worden, weil dasselbe durch sein hochgradig seniles Aussehen aufgefallen war. Dass der Index des Versuches No. 3 so klein ausgefallen ist, liegt also einmal an der günstigen Wahl des geprüften Querschnittes und dann an dem hohen Alter des betreffenden Individuums.

Für die Beurtheilung des Ergebnisses der Versuche No. 4 und 12 ist noch ein besonderer Umstand zu berücksichtigen. Der Bruch des über die laterale Fläche gebogenen Schienbeines ist beidemal in regelrechter Weise, also hart an der Einspannungsstelle erfolgt. Dagegen ist bei Biegung der anderen Schienbeine über die mediale Kante das eine Mal, in Versuch No. 4, bevor der Bruch an der Einspannungsstelle erfolgte, durch eine Belastung von 131 kg die Epiphyse abgesprengt worden, und das andere Mal, in Versuch No. 12, hat die Einspannung nicht Stand gehalten: als die biegende Kraft eine Höhe von 300 kg erreichte, zog sich der Knochen heraus, so dass ein Bruch überhaupt nicht erfolgte. Obwohl demnach beide Versuche nicht vollständig geglückt sind, so sind dieselben dennoch insofern beweiskräftig, als in beiden Fällen der über die mediale Kante zu biegende Knochen schon einer grösseren Belastung widerstanden hat, als zum Bruch des anderen Knochens über die laterale Fläche erforderlich gewesen ist.

Solcherweise erklären sich also die Schwankungen der Indexwerthe jener 13 Versuche, bei welchen übereinstimmend das über die laterale Fläche gebrochene Schienbein eine geringere Bruchlast als das zugehörige, über die mediale Kante gebogene erfordert hat. Es soll jetzt erörtert werden, auf welche besonderen Verhältnisse das abweichende Ergebniss der Versuche No. 13 und 16 zurückzuführen ist.

Die bei dem 13. Versuche benutzten, in der Tabelle mit 8 r. und 8 l. bezeichneten Schienbeine haben, ebenso wie ihre Prüfung ein abweichendes Ergebniss gehabt hat, auch ganz ungewöhnliche Formverhältnisse dargeboten. Wenn man die unten ab-

gebildeten Querschnitte eines dieser Schienbeine (Fig. 13) mit den an früherer und an späterer Stelle beigegebenen Abbildungen anderer gewöhnlichen Schienbeine[1]) vergleicht, so findet man, dass in dem vorliegenden Falle einerseits die beiden unteren Querschnitte (b u. c) sich in ihrer Form keineswegs auch nur annähernd mit einem rechtwinkeligen Dreieck vergleichen lassen, dass andererseits auf dem Querschnitt von der Grenze des oberen Drittels dieser Schienbeine (a) die Vorwölbung der hinteren Seite mehr nach der lateralen hinteren Ecke zu gelegen ist, während bei den entsprechenden Querschnitten der anderen Schienbeine die hintere Seite in der Nähe der medialen Ecke am stärksten sich vorwölbt, — kurz man findet, dass bei den in Rede stehenden Schienbeinen die einzelnen Wandungsabschnitte unter ungewöhnlichen Winkeln zusammenstossen.

Da nun im Sinne des Gesetzes der funktionellen Knochengestalt eine derartige abweichende Form unbedingt auf eine entsprechend abweichende Beanspruchung der Knochen bezogen werden muss, so ist auch speciell in diesem Falle nach den Personalien des betreffenden Individuums gefragt worden. Gemäss den diesbezüglichen Aufzeichnungen des anatomischen Instituts handelt es sich um die Knochen eines dreiundfünfzigjährigen Schneiders. Danach können gewiss sehr wohl aussergewöhnliche Beanspruchungsverhältnisse der Schienbeine vorgelegen haben. Beim Stehen, beim Gehen, Laufen und Springen werden die Schienbeine, wie die Analyse der mechanischen Beanspruchung ergeben hat, in frontaler Ebene nur durch solche Kräfte auf Biegung beansprucht, welche eine Ausbiegung der Knochen lateralwärts[2]) erstreben. Wenn aber ein Schneider in der bekannten Weise, mit untergeschlagenen Beinen, den ganzen Tag über auf seinem Tische sitzt, gegebenenfalls darauf noch in solcher Haltung umherrutscht, dann liegen thatsächlich die Dinge so, dass die Schienbeine auch in entgegengesetzter Richtung, medialwärts auf Biegung beansprucht werden. Bei fortgesetzter Einwirkung dieser abnormen Beanspruchungsverhältnisse muss sich eine entsprechend abnorme Anordnung der Knochensubstanz herausbilden, und hierdurch

[1]) Vergl. oben Fig. 7 S. 58, unten Fig. 19 S. 104.

[2]) Die Worte „eine Ausbiegung lateralwärts“ bedeuten das Gleiche wie die Worte „eine Biegung über die mediale Kante“. Bei einer Biegung über die mediale Kante erfolgt ja die Vorwölbung des Schienbeines lateralwärts. — Vergl. oben die Bemerkung auf S. 71.

wird dann bei solchen Versuchen ein abnormes Ergebniss bedingt.

Auf Grund der einen Beobachtung kann ich jene abnorme

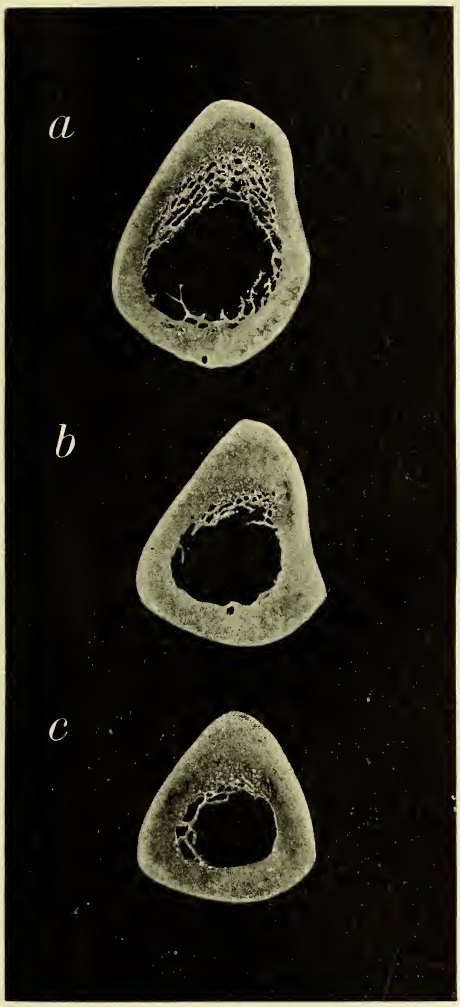


Fig. 13. Querschnitte eines gewöhnlichen (rechten) Schienbeines von abnormer Form, a von der Grenze des oberen Drittels, b aus der Mitte, c von der Grenze des unteren Drittels.

Form noch nicht als den Typus eines Schneiderschienbeines hinstellen, nur die Thatsache möchte ich noch einmal besonders betonen, dass in diesem Versuch mit ungewöhnlichem Ergebniss

auch nachgewiesenermaassen eine ungewöhnliche Form und Gelegenheit zu ungewöhnlicher Beanspruchung der Knochen vorgelegen hat. Darin liegt doch gewiss eine mittelbare Bestätigung des Werthes der anderen Versuchsergebnisse.

Bei Versuch No. 16 ist das abweichende Ergebniss deshalb noch besonders auffallend, weil dasselbe Knochenpaar bei Prüfung an einem mehr distal gelegenen Querschnitt (in Versuch No. 15) den niedrigen Index 75,7 ergeben hat. Aber das verschiedene Verhalten der beiden Ergebnisse liegt eben zur Hauptsache schon darin begründet, dass bei Versuch No. 15 ein Querschnitt in der Nähe der Grenze des unteren Drittels der Schienbeine, bei No. 16 dagegen eine noch proximal von der Mitte gelegene Stelle geprüft worden ist, — ich verweise wiederum darauf, dass an späterer Stelle[1]) der Grund dieses Einflusses der Lage des geprüften Querschnittes besprochen werden wird. Für den Versuch No. 16 kommt dann als besonderer Umstand hinzu, dass die Einspannung der zu nochmaliger Prüfung benutzten Knochenstücke dies eine Mal nicht sorgfältig genug ausgeführt worden ist: Es kamen in Folge dessen die zur Kennzeichnung der frontalen Durchschnittsebene auf die Gelenkflächen der Schienbeine eingeritzten Linien nicht genau in die Biegungsebene zu stehen, sondern sie kreuzten sich mit derselben unter einem kleinen Winkel und zwar bei dem einen Knochen in entgegengesetztem Sinne wie bei dem anderen. Dieser Umstand erklärt vollends das abweichende Ergebniss des Versuches No. 16, so dass auch durch diesen die Beweiskraft der übrigen Versuche nicht in Frage gestellt wird.

Bei der überwiegenden Mehrzahl der angestellten Versuche hat also von den unter gleichen Bedingungen geprüften Schienbeinen das über die laterale Fläche gebogene eine kleinere Bruchlast erfordert als das über die mediale Kante gebogene. Auf die relative Stärke der zusammengehörenden Knochen ist immer die nöthige Rücksicht genommen worden. Unter diesen Umständen dürfte aus den Versuchen erstens hervorgehen:

1. dass in der Regel auch ein und dasselbe Schienbein in einem bestimmten Querschnitt eine geringere Festigkeit darbietet bei Ausbiegung medialwärts als bei solcher lateralwärts.

---

[1]) Vergl. unten S. 84, 85.

Ein Versuchsergebniss mit dem Index 75 würde — vorausgesetzt, dass die beiden geprüften Schienbeine die gleiche Stärke besessen hätten — beweisen, dass das einzelne Schienbein in dem geprüften Querschnitte der Durchbiegung nach innen einen drei Viertel so grossen Widerstand entgegengesetzt habe, wie der Durchbiegung nach aussen. Indem nun ein Theil der Versuche annähernd den Index 75 ergeben hat, ist zweitens bewiesen:

2. dass ein Theil der geprüften Schienbeine in dem betreffenden Querschnitte nur eine annähernd drei Viertel so grosse Festigkeit für die Ausbiegung medialwärts, wie für diejenige lateralwärts besessen hat.

Fortsetzung von Abschnitt III.

Inwiefern wird nun, um an die früheren Erörterungen wieder anzuknüpfen, durch das Ergebniss der angestellten Festigkeitsversuche bestätigt, dass die Dreiecksform des Schienbeinquerschnittes gegenüber der frontalen Biegungsbeanspruchung einen Querschnitt von gleicher Festigkeit darstellt?

Wenn sich auch gezeigt hat, dass die geprüften Schienbeine fast durchweg gegen Ausbiegung medialwärts weniger widerstandsfähig waren als gegen eine solche lateralwärts, so ist doch andererseits nur bei dem dritten Theil der Versuche das Ergebniss vollkommen ein derartiges gewesen, wie man es bei einem Querschnitt von gleicher Festigkeit und einem Material, dessen Festigkeitskoefficienten für Zug und Druck sich annähernd wie 3 : 4 verhalten, erwarten muss; nur bei diesem Theil der Versuche hat das medialwärts gebogene Schienbein nur annähernd drei Viertel der Festigkeit besessen.

Es ist zu bedenken, dass die Schienbeine auch nicht gleichmässig in der ganzen Länge des Schaftes die einem rechtwinkeligen Dreieck vergleichbare Querschnittsform besitzen. Gewöhnlich ist diese am meisten ausgesprochen wenig oberhalb der Grenze des unteren Drittels, seltener mehr in der Nähe der Mitte des Schienbeines.

Ein solches Verhalten der Querschnittsformen entspricht auch, einerseits, vollkommen dem Ergebniss der Analyse der Beanspruchung des Schienbeines. Denn hiernach muss die, für die Dreiecksform des Querschnittes so wesentliche, frontale Biegungsbeanspruchung in der Nähe des unteren Drittels beziehungsweise in der Mitte des Schienbeines einen grösseren Einfluss auf die Querschnittsform besitzen als weiter proximalwärts, wo unter dem überwiegenden Einfluss der sagittalen Biegung der Tiefendurchmesser des Schienbeines stärker zunimmt, oder auch als weiter distalwärts, wo unter dem überwiegenden Einfluss der Strebebeanspruchung die Querschnittsform eine mehr rundliche wird.

Durch die verschiedene Beschaffenheit der Querschnitte in den verschiedenen Theilen des Schaftes muss sodann, andererseits, jener Einfluss der Lage des geprüften Querschnittes

auf das Ergebniss der angestellten Biegungsversuche bedingt werden, von welchem bei der Besprechung dieser Versuche wiederholt[1]) die Rede gewesen ist: Wenn die dreieckige, besser die rechtwinkelig-dreieckige Querschnittsform des Schienbeines die fragliche Bedeutung besitzen soll, dann kann füglicher Weise nur die Prüfung von solchen Querschnitten ein Verhältniss der Bruchlasten von annähernd 3 : 4 ergeben, bei welchen die betreffende Formeigenthümlichkeit auch wirklich deutlich hervortritt, — was, wie ich schon vorhin bemerkte, in der Regel für die wenig oberhalb der Grenze des unteren Drittels gelegenen Querschnitte zutrifft, seltener für solche näher der Mitte des Schienbeines. Je mehr die Schienbeinquerschnitte proximalwärts oder distalwärts die Dreiecksform einbüssen, um so mehr müssen sich auch ihre Festigkeitsverhältnisse ändern. Je weiter entfernt von der Stelle mit besonders ausgesprochener Dreiecksform die Querschnitte liegen, um so geringere Unterschiede der Bruchlasten müssen sich im Falle einer Prüfung ergeben, beziehungsweise um so grössere Werthe müssen die Indexe der Versuchsergebnisse erhalten.

Von den angestellten Versuchen sind nun aber diejenigen mit den günstigsten Ergebnissen gerade solche, bei welchen ein Querschnitt mit möglichst ausgeprägter Dreiecksform zur Prüfung gelangt ist. Daher wird denn durch den Umstand, dass nur ein Theil der Versuche vollkommen das erwartete Ergebniss lieferte, nur um so überzeugender bewiesen, dass der mechanische Sinn der Dreiecksform des Schienbeinquerschnittes richtig gedeutet worden ist.

Die allgemeinen Formeigenthümlichkeiten des Schienbeines besitzen also, wie ich zum Schluss wiederholen möchte, die folgende mechanische Bedeutung.

1. Die einem rechtwinkeligen Dreieck sich nähernde Querschnittsform des Schienbeines in dem distalen Theile seines Schaftes bietet für die beiden Ebenen der physiologischen Biegung, die frontale und die nahezu sagittale, ein **möglichst grosses Widerstandsmoment,** und zugleich gegenüber der in der frontalen Ebene konstant lateralwärts erfolgenden Biegungsbeanspruchung einen **Querschnitt von gleicher Festigkeit.**

[1]) Vergl. oben S. 77 und S. 82.

2. Die proximalwärts und hauptsächlich zu Gunsten des Tiefendurchmessers erfolgende Umfangszunahme der Querschnitte verleiht dem Schienbein gegenüber den sagittalen Biegungsbeanspruchungen die Eigenschaft eines **Körpers von gleicher Biegungsfestigkeit.**

IV.

Zur Erklärung der individuellen Verschiedenheiten der Schienbeinformen.

Die individuellen Verschiedenheiten der Schienbeinformen sind folgerechter Weise auf entsprechende individuelle Verschiedenheiten der Beanspruchung der Schienbeine zu beziehen, natürlich nicht eine verschiedene Länge der Knochen, welche im Wesentlichen erblich bedingt ist, und selbstverständlich auch nicht irgendwelche durch pathologische Vorgänge bewirkte Abweichungen.

Unterschiede der Beanspruchung können zunächst innerhalb jener allgemeinen Grenzen, wie sie als bei der gewöhnlichen, physiologischen Verwendung der unteren Gliedmaassen zutreffend an früherer Stelle ermittelt worden sind, in verschiedenem Sinne vorliegen.

Zwei Individuen, das eine mit einem Körpergewicht von fünfzig Kilogrammen, das andere mit einem solchen von hundert, mögen alle ihre Bewegungen in genau der gleichen Weise ausführen. Die Beanspruchung ihrer Schienbeine wird dann ebenfalls in der gleichen Art und Weise erfolgen. Es werden auch die einzelnen Bestandtheile der zusammengesetzten Beanspruchung die gleiche relative Stärke besitzen, ihre absolute Stärke aber muss natürlich bei dem schwereren Individuum die doppelte sein.

Die Grösse der einwirkenden Kräfte bestimmt die Zahl und die Stärke der Strukturelemente des Knochens, somit die Grösse der Querschnittsform. Die Art und Weise der Beanspruchung bestimmt den Typus der Querschnittsform[1]). Gemäss diesen

[1]) Vergl. oben S. 8.

Sätzen werden die Schienbeine der fraglichen Individuen an den einander entsprechenden Stellen Querschnittsformen vom gleichen Typus, aber von verschiedener Grösse besitzen.

Eine andere Verschiedenheit der Beanspruchungen innerhalb der gewöhnlichen Grenzen liegt dann vor, wenn in Folge der abweichenden Lebensgewohnheiten zweier Individuen die Bestandtheile der zusammengesetzten Beanspruchung ihrer Schienbeine auch eine verschiedene relative Stärke erhalten.

Bei einem Steinträger beispielsweise werden in Folge seines gewöhnlich etwas steifbeinigen und breitspurigen Ganges, bei welchem im Knie und im Fussgelenk nur geringe Beugungen stattfinden, die Biegungsbeanspruchungen, zumal die sagittalen, zurücktreten gegenüber der Beanspruchung auf Strebefestigkeit. Umgekehrt werden bei einer Tänzerin, welche so häufig, mit einem Beine das Körpergewicht unterstützend, in dessen Gelenken kräftige Bewegungen auszuführen pflegt, die Biegungsbeanspruchungen und hiervon gerade vorzugsweise die sagittalen, eine verhältnissmässig grosse Rolle spielen. Solcherweise erhalten bei zwei Individuen mit derartig verschiedenen Lebensgewohnheiten die einzelnen Bestandtheile der Schienbeinbeanspruchung eine sehr verschiedene relative Stärke, und demgemäss hat man bei ihnen auch gewisse Verschiedenheiten in dem Typus der Querschnittsformen des Schienbeines zu erwarten. — Beiläufig bemerkt muss auch die Körperbeschaffenheit, namentlich die Grösse des Fusses, einen bestimmten Einfluss auf die Beanspruchung, beziehungsweise auf die Form der Schienbeine besitzen.

Ausser diesen Verschiedenheiten der Beanspruchungen innerhalb der allgemeinen gewöhnlichen Grenzen können sodann natürlich auch aussergewöhnliche Beanspruchungsverhältnisse in einzelnen Fällen vorliegen und einen entsprechenden, aussergewöhnlichen Typus der Querschnittsform bewirken, — wie dies ja, beispielsweise, bereits bezüglich jener von einem Schneider herstammenden Schienbeine vermuthet worden ist[1]).

Die oben (in Fig. 7 S. 58 und Fig. 13 S. 81) abgebildeten Schienbeinquerschnitte zeigen zugleich die Wirkung einer verschiedenen Qualität und einer verschiedenen Quantität der Beanspruchung: die Querschnitte besitzen einen verschiedenen Typus und eine verschiedene Stärke. — Bei dem in Fig. 7 abgebildeten Schienbein erscheint die Markhöhle auf Kosten der kompakten

[1]) Vergl. oben S. 80 ff.

Substanz erweitert; der Knochen bietet das Bild der excentrischen Atrophie, wie sie vorzüglich im Greisenalter aufzutreten pflegt. Dass dann auch, hauptsächlich in Folge der gleichzeitigen Atrophie der Muskeln, die Quantität der Beanspruchung eine erheblich geringere ist, habe ich bereits anderswo[1]) weiter ausgeführt.

Eine bestimmte und mehrfach hervorgehobene Abweichung zeigen konstant die kindlichen Schienbeine: dieselben besitzen, wie man angegeben findet, „eine mehr rundliche Form".

Fig. 14. Querschnitte des (rechten) Schienbeines eines Neugeborenen. a von der Grenze des oberen Drittels, b aus der Mitte, c von der Grenze des unteren Drittels.

An den in Fig. 14 abgebildeten Querschnitten des rechten Schienbeines von einem Neugeborenen, insbesondere an den beiden unteren (b und c), kann man sich überzeugen, dass doch auch schon die dreieckige Beschaffenheit des Querschnittes angedeutet ist. Bei den mir zu Gesicht gekommenen Schienbeinen von Kindern, welche bereits das dritte Lebensjahr überschritten hatten, habe ich, abgesehen von den anderen Grössenverhältnissen, überhaupt nicht mehr ein wesentlich abweichendes Verhalten im Vergleich zu den Schienbeinen der Erwachsenen finden können. Es besitzen also wohl nur die Schienbeine von Kindern in den zwei bis drei ersten Lebensjahren jene weniger markante Form, — und dies lässt sich gewiss leicht in folgender Weise begründen.

Bevor die Kinder zu stehen vermögen, werden die zarten Knochen nur durch die Spannung der Muskeln zwischen den Ansatzpunkten der letzteren zur Hauptsache auf Strebefestigkeit beansprucht. Bei den Strampelbewegungen der Beinchen, welche ja schon früh im fötalen Leben sich bemerkbar zu machen beginnen, werden dann auch schon minimale Biegungsbeanspruchungen veranlasst. Wenn sodann weiterhin die Kinder anfangen, stehen und gehen zu lernen, so erfolgen stärkere Strebe- und auch besonders stärkere Biegungsbeanspruchungen. Jedoch bei den ersten Gehübungen ist der Gang watschelnd und breitbeinig, und zwar dies namentlich des-

[1]) H. H. Hirsch, a. a. O. S. 22 ff.

halb, weil die Kinder nicht gleich ihre Füsschen derartig vom Boden „abzuwickeln“ vermögen, wie es in der Folge durch kräftigeren Gebrauch vornehmlich der Wadenmuskulatur ausgeführt zu werden pflegt. Daher spielen, was schon an einer früheren Stelle angenommen worden ist[1]), die sagittalen Biegungsbeanspruchungen anfänglich nicht eine verhältnissmässig so grosse Rolle, wie denn überhaupt bei einem solch mangelhaften Gange die Biegungsbeanspruchungen noch nicht in so typischer Weise, in jenen zwei bestimmten Ebenen, erfolgen können.

Diese kurzen Andeutungen dürften wohl schon zur Genüge erkennen lassen, dass der in den ersten Lebensjahren mehr rundlichen Schienbeinform auch eine entsprechende, weniger typische Beanspruchung gegenübersteht. Auf jeden Fall aber ist die abweichende Gestaltung des kindlichen Schienbeines, bei gleichzeitiger Berücksichtigung der Mangelhaftigkeit der Fortbewegung der Kinder in jenem Lebensalter, insofern von grosser Wichtigkeit, als die sich hieraus ergebende Thatsache, dass die vollkommenere Ausprägung der typischen Schienbeinmerkmale zeitlich zusammenfällt mit dem Auftreten der geregelteren Beanspruchung, gewiss auch ein überzeugender Beweis ist für den ursächlichen Zusammenhang, welcher zwischen Form der Knochen und ihrer Funktion bestehen soll.

Es giebt nun noch einen von der gewöhnlichen Schienbeinform in ganz besonders auffallender Weise abweichenden Schienbeintypus, welcher in mancher Beziehung sehr interessant ist und mit welchem sich auch insbesondere die Anthropologen schon vielfach beschäftigt haben, ich meine das sogenannte platyknemische Schienbein. Seiner Erklärung sollen nunmehr noch ausführliche Erörterungen gewidmet werden, denn die vorliegenden Erklärungsversuche sind alle, wie nachgewiesen werden wird, theils unvollkommen, theils gänzlich verfehlt. Gerade die Erörterung der Platyknemie wird sich auch als sehr geeignet erweisen, den Werth der gewonnenen Einsicht in die Bedeutung der gewöhnlichen Schienbeinform, beziehungsweise den Werth der Erkenntniss des Gesetzes der funktionellen Knochengestalt, darzuthun.

---

[1]) Vergl. oben S. 49.

IV A.

Die Platyknemie.

Da man ausserhalb des Kreises der Fachanthropologen nur selten eine genauere Kenntniss der Platyknemie antrifft, so soll zunächst in aller Kürze mitgetheilt werden, was über die Besonderheit dieses abweichenden Schienbeinzustandes, sowie über seine Verbreitung bekannt ist (Absatz 1).

Weiterhin will ich dann versuchen, die Unzulänglichkeit der früheren Erklärungsversuche nachzuweisen (Absatz 2, S. 95) und, im Anschluss hieran, als die richtige, beziehungsweise die vollkommene Erklärung, eine solche durch das Gesetz der funktionellen Knochengestalt beizubringen (Absatz 3, S. 103).

1. Ueber die Besonderheit des platyknemischen Schienbeines und seine Verbreitung.

Als Platyknemie (πλατύς breit, platt, κνήμη Schienbein) bezeichnet man die besondere Beschaffenheit von Schienbeinen, welche in der oberen Hälfte oder auch in den oberen zwei Drittheilen des Schaftes eine im Verhältniss zur Tiefe ungewöhnlich geringe Breite besitzen.

Bei Betrachtung der nachfolgend abgebildeten Querschnitte eines gewöhnlichen und eines platyknemischen Schienbeines (Figg. 15 und 16) fällt sofort die auffallende Schmalheit des platyknemischen Querschnittes in's Auge. Vergleicht man die Formen etwas genauer, so findet man, dass das platyknemische Schienbein eine weit weniger deutlich vorspringende mediale und laterale Kante besitzt als das gewöhnliche, dass dagegen bei dem ersteren der Vorsprung in der hinteren Seite weit stärker hervortritt. Solcherweise zeigt das platyknemische (in seinem oberen Theile) eine vordere und eine hintere Kante, eine mediale und

eine laterale Fläche, — im Gegensatz zu dem gewöhnlichen Schienbeine, an welchem leicht eine vordere, eine mediale und eine laterale Kante, und dementsprechend drei Flächen, unterschieden werden können. Ein Schienbein von der Form des abgebildeten platyknemischen lässt sich gewiss, wie man das mehrfach gethan hat, mit einer Säbelscheide vergleichen.

Andere platyknemische Schienbeine besitzen nicht eine so scharf vorspringende Kante in der Hinterfläche, wie denn über-

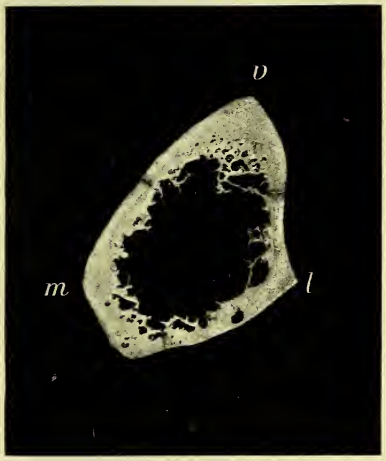


Fig. 15. Querschnitt eines gewöhnlichen Schienbeines von einem modernen Europäer, I = 75,5.

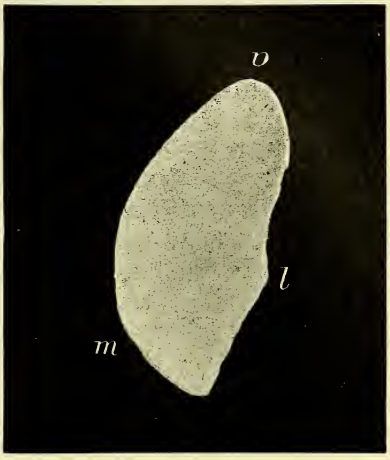


Fig. 16. Umriss des Querschnittes eines stark platyknemischen Schienbeines von einem neolithischen Europäer, nach einem Gipsabguss[1]). I = 50.

Beide Querschnitte von der Grenze des oberen Drittels eines rechten Schienbeines; v, m und l vordere, mediale und laterale Ecke. (Die Lage des Punktes m ist bei dem platyknemischen Querschnitte in der Weise genau festgestellt worden, dass der Verlauf der im unteren Theile des betreff. Schienbeines deutlicher vorspringenden medialen Kante nach oben hin verfolgt wurde.)

haupt als das Merkzeichen eines platyknemischen Schienbeines lediglich die auffallende Schmalheit desselben in den oberen Theilen seines Schaftes anzusehen ist.

---

[1]) Das betreffende Original-Schienbein gehört zu jenem, von dem russischen General v. Erckert in der Weichselgegend Cujaviens aufgefundenen und von demselben der Berliner anthropologischen Gesellschaft zugeeigneten, neolithischen Skelete, welches Virchow in der Sitzung dieser Gesellschaft vom 20. December 1879 ausführlich besprochen hat. Siehe:

R. Virchow, Gräberfunde in Cujavien. Zeitschrift für Ethnologie 1879, Bd. XI. Verhandl. der Berliner anthropologischen Gesellschaft, S. 432.

Der platyknemische Zustand findet sich sowohl bei den verschiedenen Volksstämmen, bei welchen derselbe nachgewiesen worden ist, als auch bei Angehörigen eines und desselben Stammes in wechselnder Stärke. Um daher einen zahlenmässigen Ausdruck für den jedesmal vorliegenden Grad von Platyknemie zu gewinnen, hat Broca einen Index für denselben gebildet in der Weise, dass er den Quotienten von Breite und Tiefe des Schienbeines in der Höhe des Ernährungsloches mit 100 multiplicirt. Bezeichnet man die Breite mit B, den Tiefendurchmesser mit T und den Index mit I, so lautet die Formel für den Index:

$$I = \frac{B}{T} \times 100.$$

Als den Index des Grades der Platyknemie, oder kurz als den Platyknemieindex, bezeichnet man demnach die Indexzahl für das Verhältniss von Breitendurchmesser zu Tiefendurchmesser in einer bestimmten Höhe des Schienbeinschaftes. Je stärker der Grad der Platyknemie, d. h. je geringer die Breite im Verhältniss zur Tiefe ist, um so kleiner ist die Indexzahl, oder umgekehrt: je kleiner die Indexzahl, um so stärker der Grad der Platyknemie des betreffenden Schienbeines. — Der Index gewöhnlicher Europäerschienbeine soll im Mittel etwa 72 betragen; somit besitzt das gewöhnliche Schienbein, dessen Querschnitt oben abgebildet ist (Fig. 15), mit dem Index 75,5 eine ziemlich breite Beschaffenheit, wohingegen der Index 50 jenes neolithischen Schienbeines einen sehr hohen Grad von Platyknemie bedeutet.

An dieser Stelle möchte ich einige kritische Bemerkungen anfügen, zunächst betreffend die übliche Wahl des zur Indexbestimmung benutzten Querschnittes. Das Verhältniss von Breite zu Tiefe, oder, um an die obige Formel anzuknüpfen, der Quotient $\frac{B}{T}$ ist bei den einzelnen Schienbeinen in den verschiedenen Höhen des Schaftes ein verschiedener. Man muss daher, wenn man aus dem Vergleich der Indexzahlen verschiedener Schienbeine bezüglich der Formverhältnisse der letzteren einen Schluss ziehen will, die Indexe für einander entsprechende Querschnitte vergleichen. Das gemeinte Foramen nutritium in der Hinterseite des Schienbeines liegt nun zwar gewöhnlich in der Nähe oder auf der Grenze des oberen Drittels, aber seine Lage kann auch in beträchtlicherer Weise variiren. An einem Schienbeinpaare vermochte ich festzustellen, dass bei dem rechten Schienbeine das Foramen 2 Centimeter höher lag als bei dem linken. Als ich verschiedene Paare von Schienbeinen untersuchte, ergaben sich schon

Unterschiede von über 4 Centimeter bezüglich der relativen Lage des Ernährungsloches. Man erhält also, wenn man jedesmal in der Höhe des Ernährungsloches den Index bestimmt, nicht Indexwerthe von einander genau entsprechenden Stellen. Um diese Ungenauigkeit — sie mag für gewöhnlich unerheblich sein — zu vermeiden, habe ich die Messungen zur Bestimmung des Platyknemie-Indexes jedesmal genau an der Grenze des oberen und mittleren Drittels der Schienbeinlänge vorgenommen.

Sodann kann ich nicht umhin, in etymologischer Hinsicht zu bemerken, dass man den fraglichen Schienbeinzustand nicht Platyknemie, sondern eigentlich Stenoknemie hätte benennen müssen. Man bezeichnet doch in der Anthropologie als platyrhin eine Nase von besonders kurzem sagittalen und besonders grossem frontalen Durchmesser, oder als platycephal einen Schädel mit verhältnissmässig kleinem sagittalen und verhältnissmässig grossem frontalen Durchmesser, dagegen nennt man einen Schädel, bei welchem umgekehrt der frontale Durchmesser verhältnissmässig klein ist, stenocephal. Wenn man auf ähnlich zusammengesetzte Bildungen der klassischen griechischen Sprache zurückgeht, so findet man ebenfalls, dass Zusammensetzungen mit πλατύς sich immer auf einen verhältnissmässig grossen frontalen, solche mit στενός auf einen verhältnissmässig kleinen frontalen Durchmesser beziehen (πλατυνῶτος breitschulterig, στενοθώραξ engbrüstig).

Schliesslich möchte ich es noch mit ein paar Worten rechtfertigen, dass ich, im Gegensatz zu den anderen Autoren, den Tiefendurchmesser der abgebildeten Schienbeinquerschnitte nicht senkrecht zur Verlaufsrichtung der Zeilen, sondern ein wenig schräg zu ihr gesetzt habe: Bei natürlicher Haltung der Beine sind die Fussspitzen etwas nach aussen gestellt. Eine durch die Fersenmitte und das Grosszehengelenk eines Fusses gelegte Axe verläuft nicht in sagittaler, sondern in etwas schräger Richtung. Mit dieser Axe fällt der Tiefendurchmesser eines Schienbeinquerschnittes von der Grenze des oberen Drittels mehr oder weniger vollkommen in dieselbe Ebene zusammen. Es ist also oben der Tiefendurchmesser der Schienbeinquerschnitte deshalb etwas schräg gelegt, weil dies mehr seiner Richtung bei natürlicher Haltung der unteren Gliedmaassen entspricht.

Was nun die Verbreitung der Platyknemie betrifft, so ist diese Erscheinung zum ersten Male in den Jahren 1863 und 1864 von dem Engländer Busk[1]) und dem französischen Forscher Broca[2]) an menschlichen Schienbeinen aus alten Höhlen von

[1]) International Congress of Prehistoric Archaeology at Norwich. London 1869, p. 14, 161.

[2]) P. Broca, Sur les crânes et ossements des Evzies. Bullet. de la Soc. d'anthropologie de Paris 1868. Sér. II, T. III, p. 363.

Gibraltar, beziehungsweise aus einem Dolmen des nördlichen Frankreichs, demnach herrührend von vorgeschichtlichen Bevölkerungen der Steinzeit, nachgewiesen worden. Im Uebrigen lässt sich bezüglich ihres Vorkommens allein aus den Verhandlungen der Berliner anthropologischen Gesellschaft ein recht gutes Bild gewinnen. Dort hat nämlich Virchow[1]) bei einer ganzen Reihe von Volksstämmen die Platyknemie nachgewiesen: Zuerst bei den Negritos der Philippinen (vergl. Fig. 20 S. 105), sodann bei brasilianischen Indianern, bei den Andamanesen Hinterindiens, bei Südseeinsulanern, nämlich den Bewohnern von Oahu im Sandwicharchipel; — ferner bei einem in der Weichselgegend Cujaviens aufgefundenen neolithischen Skelete (von dessen in Gips abgegossenem Schienbeine eben Fig. 16 einen Querschnitt darstellt), bei transkaukasischen Gräberfunden, welche den ersten Jahrhunderten unserer Zeitrechnung zugeschrieben werden, und schliesslich noch an Skelettheilen, welche durch die bekannten Ausgrabungen von Schliemann und Calvert aus einem der grossen Grabhügel in der Troas, dem Hanai Tepeh, zu Tage gefördert worden sind. — Ausserdem ist die Platyknemie, von vielen anderen Forschern, noch in manchen weiteren Fällen nachgewiesen worden; bemerkt sei nur noch, dass Turner[2]) sie auch bei afrikanischen Negern, nämlich bei den Buschmännern, gefunden hat, und dass sie erst jüngst noch von Paul und Fritz Sarasin[3]) bei den Weddas auf Ceylon beschrieben worden ist.

Zur Vervollständigung des Bildes von der Verbreitung der Platyknemie ist dann noch zu erwähnen, dass auch einzelne Anthropoiden platyknemische Schienbeine besitzen sollen. Allerdings weichen die diesbezüglichen Angaben der Autoren von einander ab. Broca betrachtet die platte Tibiaform als charakteristisch für die grossen Affen. Aehnlich giebt Manouvrier an, dass Gorilla und Schimpanse in der Regel einen mittleren Grad

---

[1]) Zeitschrift für Ethnologie 1872, Bd. IV. Verhandl. der Berliner anthropologischen Gesellschaft, S. 207. — 1875, Bd. VII. Verh. S. 170. — 1876, Bd. VIII. Verh. S. 108. — 1880, Bd. XII. Verh. S. 117—119. — 1879, Bd. XI. Verh. S. 433. — 1882, Bd. XIV. Verh. S. 481.

[2]) Citirt nach P. und F. Sarasin (vergl. die folgende Literaturangabe); bei diesen findet man ein ziemlich ausführliches Literaturverzeichniss der Platyknemie auf S. 307 ff., auf welches bei fehlender Literaturangabe Bezug genommen sei.

[3]) P. u. F. Sarasin, Ergebnisse naturwissenschaftl. Forschungen auf Ceylon. Wiesbaden 1887—1893, Bd. III. Die Weddas auf Ceylon. S. 293.

von Platyknemie aufweisen, dass nur der Orang-Utang eine Ausnahme unter den Anthropoiden mache. Hingegen sind nach Virchow[1]) die im Dresdener zoologischen Museum aufgestellten Gorilla-, Schimpanse- und Orang-Utangskelete alle nicht platyknemisch. Aus eigner Anschauung vermag ich mitzutheilen, dass ein im Berliner Museum für Naturkunde aufgestelltes Orang-Utangskelet — andere Anthropoidenskelete konnte ich dort nicht entdecken — sogar recht breite Schienbeine besitzt; doch habe ich ebendaselbst bei den Skeleten verschiedener kleinerer Affen (Hylobathes syndactylus, Ateles ater, Cercopithecus mona, Cercocebus aethiops) sehr schmale Schienbeine, ausgesprochen platyknemische, wahrgenommen. Daher ist es mir unzweifelhaft, dass bei den Affen im Allgemeinen eine ähnlich abweichende Schienbeinform sehr wohl anzutreffen ist; ob dieselbe gerade bei den Anthropoiden vorkomme, muss ich allerdings dahingestellt sein lassen.

Es steht somit fest, dass die Platyknemie einmal bei sehr alten Volksstämmen und dann bei Stämmen niedrigerer Kulturstufe sehr verbreitet ist, sowie dass eine ähnliche Schienbeinbeschaffenheit auch bei den Affen zu beobachten ist. Andererseits ist von einem Vorkommen der Platyknemie bei den modernen civilisirten Völkern bisher nichts bekannt geworden.

Unter solchen Umständen kann es gewiss nicht Wunder nehmen, dass die Frage nach der Bedeutung der Platyknemie, nach der Ursache ihrer Entstehung von den Anthropologen schon vielfach erörtert worden ist. Die angestellten Erklärungsversuche sollen im Folgenden besprochen werden.

2. Die früheren Erklärungsversuche der Platyknemie.

Anfänglich hat man ziemlich allgemein aus der Thatsache, dass die Platyknemie nur bei sehr alten und sehr niedrigen Volksstämmen und dann auch bei einigen Affen zur Beobachtung gelangt ist, den Schluss ziehen zu dürfen geglaubt, der fragliche Zustand der Schienbeine stelle das erbliche Merkmal einer niederen Rasse vor. Broca[2]) hat ihn in diesem Sinne geradezu ein „pithekoides Merkmal“ genannt, ein Merkmal, welches jene

[1]) R. Virchow, Zeitschrift für Ethnologie 1880. Verhdlg. der Berliner anthropol. Gesellschaft, S. 119.

[2]) Broca, a. a. O.

niederen Menschenrassen als den Affen näherstehend kennzeichnen solle. Schaaffhausen[1]) hat denselben in ähnlichem Sinne als eine „primitive Bildung“ betrachtet. Daneben haben sich die gleichen Autoren auch in der Weise geäussert, als ob die fragliche Erscheinung zugleich als der „Ausdruck einer niederen Kulturstufe“ mit irgend welchen besonderen Lebensgewohnheiten jener niedrigen Menschenrassen in Beziehung zu bringen sei. Schaaffhausen nämlich hat sie zu einem vermeinten vornüber geneigten Gange in Beziehung bringen wollen, und auch Broca hat ausdrücklich die Möglichkeit betont, dass ein besonderer Gebrauch der Unterschenkelmuskeln mit eine Rolle spielen könne.

Diesen ersten Erklärungsversuchen ist nach meiner Ansicht, welche Ansicht ich allerdings an dieser Stelle nicht zu begründen versuchen will, entgegenzuhalten, dass es überhaupt von vorneherein nicht angängig sein kann, eine Formeigenthümlichkeit von der Art der Platyknemie zugleich als ein erbliches Rassenmerkmal und als etwas durch Anpassung an umgebende Lebensbedingungen Erworbenes hinzustellen: Eine solche Eigenthümlichkeit kann nur entweder etwas Ererbtes oder etwas Erworbenes vorstellen, nur entweder das eine oder das andere, aber nicht beides zugleich.

Jenen Erklärungsversuchen ist auch bereits zu Anfang der achtziger Jahre Virchow[2]) mit grossem Nachdruck entgegengetreten. Derselbe hatte nämlich an den Fundergebnissen, welche damals gerade aus dem trojanischen Grabhügel gewonnen worden waren, festgestellt, dass die beiden dort gefundenen Kinderskelete breite, nicht platyknemische Schienbeine besassen, während die Skelete von Erwachsenen stark platyknemische Schienbeine zeigten. Ferner hatte Virchow an den gleichzeitig gemachten transkaukasischen Funden festgestellt, dass auch bei Stämmen von höherer Kulturstufe platyknemische Schienbeine vorkommen können. Aus der ersteren Feststellung zog Virchow den Schluss, dass die Platyknemie nicht ein sich erblich fortpflanzendes Merkmal, sondern „das Ergebniss einer späteren Entwickelung“ vorstelle. In diesem Schlusse bestärkte ihn die andere Thatsache, indem diese ihm zeigte, dass die Platyknemie nicht das Merkmal

---

[1]) Schaaffhausen, Korrespondenzblatt der deutschen Gesellschaft für Anthropologie etc. 1882, S. 169.

[2]) R. Virchow, Alttrojanische Gräber und Schädel. Abhandl. der K. Akademie der Wissenschaften zu Berlin 1882, S. 104ff.

einer inferioren Rasse und deshalb überhaupt nicht ein Rassenmerkmal zu sein beanspruchen könne. Solcherweise ist Virchow schon damals dazu gekommen, gegenüber den unklaren früheren Vorstellungen mit grosser Bestimmtheit für die Ansicht einzutreten, dass die Platyknemie lediglich den Werth einer individuell erworbenen Eigenschaft besitze. Was dann weiter die Art und Weise betrifft, wie diese Eigenthümlichkeit erworben werden solle, so giebt Virchow[1]) hierüber sein „Glaubensbekenntniss" dahin ab, dass er es für wahrscheinlicher halte, „dass die Eigenschaft sich bei jeder Bevölkerung entwickelt, die in einem gewissen starken und einseitigen Maasse ihre Unterschenkelmuskeln gebraucht".

Der Vollständigkeit wegen sei hier noch nachträglich erwähnt, dass Pruner-Bey die Platyknemie anfänglich als eine pathologische Erscheinung, bedingt durch rhachitische Erkrankung der betreffenden Individuen, zu erklären versucht hat, aber durch Broca und auch durch Virchow widerlegt worden ist.

Diejenigen Autoren nun, welche mit Virchow der Ansicht sind, die abweichende Schienbeinform entstehe in physiologischer Weise, durch eine besondere Verwendung der unteren Gliedmaassen, beziehungsweise durch einen besonders starken Gebrauch gewisser Muskelgruppen der letzteren, denken sich alle die Sachlage derart, als handele es sich um einen stärkeren Gebrauch und um eine stärkere Entwickelung der Muskeln seitlich des Schienbeines. Hierdurch solle dann ein entsprechend stärkerer Druck der anliegenden Muskeln von beiden Seiten her gegen das Schienbein erfolgen und solcherweise die „seitlich zusammengedrückte Form" des letzteren bedingt werden.

Die betreffenden Autoren gehen also sämmtlich von jener, früher eben allgemein üblichen, und auch bis heute noch sehr verbreiteten Vorstellung aus, wonach die Knochenformen durch Druckwirkungen der anliegenden Weichtheile geprägt würden. Diese Vorstellung ist in dem ersten Theile der vorliegenden Arbeit, ich darf wohl annehmen, endgültig als durchaus haltlos nachgewiesen worden. Wie sehr man aber in der irrthümlichen Vorstellung befangen gewesen ist, dafür dürfte der Um-

[1]) R. Virchow, Ueber Darwin und die Anthropologie. (Rede, gehalten auf der XIII. Anthropologen-Versammlung zu Frankfurt a. M.) Korrespondenzblatt d. deutschen Gesellsch. für Anthropologie etc. 1882, S. 87.

stand bezeichnend sein, dass selbst Virchow[1]) sich einmal folgendermaassen geäussert hat: „Die besondere Konfiguration der Platyknemie hängt unzweifelhaft zusammen mit einer grösseren Entwicklung der Muskeln an den Seiten der Tibia."

Die Früchte der unrichtigen Voraussetzung sind denn auch natürlich nicht ausgeblieben. Zunächst vermag man nicht betreffs der besonderen Verwendung der unteren Gliedmaassen, durch welche gerade die Muskeln seitlich des Schienbeines zu verstärkter Thätigkeit, beziehungsweise zu verstärkter Entwicklung angeregt werden sollten, eine Uebereinstimmung zu erzielen. Virchow[2]) z. B. wirft einmal die Frage auf, ob die Leute mit platyknemen Tibien nicht in extremstem Maasse Schnellläufer, Nomaden, Hirten oder sonst so etwas gewesen seien. Schaaffhausen[3]) hingegen hat nach wie vor an seiner, schon vorhin erwähnten Meinung, die Platyknemie hänge mit einem vornübergeneigten Gange jener Menschen zusammen, festgehalten. Nehring[4]) meint, vielleicht sei eine hockende Stellung die Ursache, und Manouvrier[5]) erörtert sogar lang und breit die Möglichkeit, dass die Erscheinung eine Folge von vielem Herumklettern auf Bäumen sein könne; — freilich weist er diese Möglichkeit selbst zurück und kommt zu dem Schlusse, dass die Entstehung platyknemer Schienbeine vielem Gehen, Laufen und Springen, dem Tragen schwerer Lasten, dem Gehen auf abschüssigem Terrain zuzuschreiben sei.

Wenn derartig verschiedene Aeusserungen geschehen sind, so ist dabei nicht ausser Acht zu lassen, dass die drei erstgenannten Autoren von vorneherein nicht eine bestimmte Behauptung, sondern nur eine Vermuthung haben aussprechen wollen. Virchow insbesondere hat ja seine Ansicht darüber, auf welche Weise die Platyknemie von einem Individuum erworben werden solle, geradezu als ein „Glaubensbekenntniss" ausgesprochen. Damit giebt doch dieser klardenkende Forscher, in richtiger Würdigung des damaligen Standes der Kenntnisse, deutlich zu verstehen, dass er diesen Theil der Frage von der Bedeutung der Platyknemie durchaus nicht für gelöst halte, dass vielmehr in

[1]) Zeitschr. f. Ethnologie 1882, Bd. XIV. Verh. S. 481.

[2]) Korrespondenzblatt der deutsch. Gesellsch. für Anthropologie 1882, S. 87.

[3]) Ebendaselbst S. 169.

[4]) Zeitschr. f. Ethnologie 1885, Bd. XVII. Verh. S. 253.

[5]) L. Manouvrier, Mémoire sur la Platycnémie. Mémoires de la soc. d'Anthropologie de Paris. (2) 3, 1888, p. 469.

dieser Hinsicht seiner Ansicht nach überhaupt noch gar nichts bewiesen, sondern alles eben nur Vermuthung sei.

Anders aber Manouvrier[1]). Derselbe hat in einer längeren Abhandlung über die Platyknemie den Versuch unternommen, jene irrthümliche Vorstellung, dass die schmalere Beschaffenheit der Schienbeine einfach durch stärkere Druckwirkung der seitlich angeordneten Muskeln bedingt werde, statt dieser allgemeineren Form eine bestimmtere Fassung zu geben; und er beansprucht nun für sich geradezu das Verdienst, den „anatomisch-physiologischen Mechanismus" der Entstehung der Platyknemie endgültig klargelegt zu haben. Deshalb muss ich mich wohl mit der von ihm entwickelten „Theorie" noch etwas eingehender beschäftigen.

Manouvrier[2]) baut seine Theorie auf die anatomische Thatsache auf, dass die Verlängerung des Tiefendurchmessers einer platyknemischen Tibia fast ausschliesslich den hinter der Crista interossea gelegenen Theil derselben betreffe. Das Wesentliche der Formabweichung soll deshalb in der Verbreiterung der Ansatzstelle des Musculus tibialis posticus und in ihrer Einstellung in die Sagittalebene bestehen, und diese Veränderungen wiederum sollen nur allein die Folgen einer Hyperaktivität des genannten Muskels sein können. Die erforderliche Steigerung der Thätigkeit des Musculus tibialis posticus, so theoretisirt Manouvrier weiter, sei natürlich bei der gewöhnlichen Funktion desselben, die in Adduktion und Extension des Fusses bestehe, nicht erklärlich, es müsse daher der Muskel in den betreffenden Fällen eine umgekehrte Funktion (fonction inverse) zu verrichten haben, und zwar müsse derselbe dort die Feststellung des Unterschenkels bei denjenigen Bewegungen zu besorgen haben, bei welchen das Körpergewicht den Unterschenkel mit besonderer Gewalt herabzudrängen strebe, wie es beim Laufen, beim Tragen schwerer Lasten, beim Gehen auf abschüssigem Terrain u. s. w. der Fall sei. — Das nennt Manouvrier eine Theorie und behauptet, damit „la véritable cause de la Platyknémie" nachgewiesen zu haben, während meiner Ansicht nach diese Ausführungen Satz für Satz jeden Haltes entbehren.

Zunächst muss ich bestreiten, dass die „anatomische Thatsache", auf welche Manouvrier seine Theorie aufbaut, über-

[1]) L. Manouvrier, a. a. O., p. 469—588.
[2]) L. Manouvrier, a. a. O., p. 503 sq.

haupt eine Thatsache ist: die Verlängerung des Tiefendurchmessers eines platyknemischen Schienbeines beruht nicht auf einer blossen Veränderung des hinteren Theiles des Querschnittes, sondern der ganze Querschnitt ist verändert. Das von Manouvrier selbst entworfene Schema (Fig. 17) lässt dies Verhalten schon deutlich erkennen. Noch deutlicher tritt es hervor bei der genauen Betrachtung von natürlichen Querschnitten, wie sie an späterer Stelle vorgenommen werden wird[1]). Ist aber der ganze Querschnitt verändert, dann kann man auch gewiss nicht ohne Weiteres die Veränderung der Grösse und Richtung eines bestimmten Wandungsabschnittes als das Wesentliche hinstellen. Was sodann die Behauptung Manouvrier's betrifft, die vor-

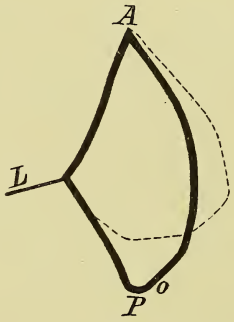


Fig. 17. Schema der Platyknemie nach Manouvrier[2]).
Der fettgedruckte Umriss: ein sehr abgeplattetes Schienbein (Index 50); der punktirte Umriss: ein gewöhnliches Schienbein (Index 80). L lig. interosseum, A vordere Kante, LP Ursprung des Musc. tibialis posticus, o linea poplitea.

liegende Formveränderung müsse auf eine Hyperaktivität des Musculus tibialis posticus bezogen werden, so ist dagegen einzuwenden, dass die Annahme einer hochgradig verstärkten Thätigkeit eines einzelnen Muskels von vorneherein äusserst bedenklich erscheinen muss. Es geschieht wohl bei der Muskulatur der Gliedmaassen überhaupt nicht, dass ein einzelner Muskel allein in Thätigkeit, beziehungsweise in hochgradig gesteigerter Weise in Thätigkeit tritt. Alle Bewegungen werden vielmehr, wie besonders Duchenne[3]) in seinen vortrefflichen Arbeiten nachgewiesen hat, immer durch die kombinirte Thätigkeit mehrerer Muskeln voll-

[1]) Vergl. unten S. 105.

[2]) Manouvrier, a. a. O., p. 498.

[3]) G. B. Duchenne, Physiologie der Bewegungen. Aus dem Französischen übersetzt von C. Wernicke, Cassel und Berlin 1885, S. 598 ff.

zogen. Und ferner, mit welchem Recht darf denn Manouvrier seiner Theorie zu Liebe die ganze Funktion der ungleich stärkeren Wadenmuskeln auf jenen einen, verhältnissmässig unbedeutenden, Muskel übertragen? Mir wenigstens ist es sehr zweifelhaft, ob Manouvrier oder irgend ein anderer jemals ein solches Bein wirklich gesehen hat, ein Bein mit mächtig entwickeltem Musculus tibialis posticus und zugleich mit kümmerlicher Wadenmuskulatur. Thatsachen müssen vorliegen, Phantasiegebilde können eine Theorie nicht stützen. Wenn schliesslich Bergesteigen, Tragen schwerer Lasten und dergleichen mehr die Entstehung der Platyknemie bedingen soll, so bleibt es doch unverständlich, dass diese nicht auch bei modernen Europäern häufig gefunden worden ist, obwohl hiervon nicht wenige jenen Bedingungen genügen.

Bezeichnender Weise haben nun neuerdings Paul und Fritz Sarasin[1]) die Platyknemie wiederum in ganz anderem Sinne zu erklären versucht. In dem schönen Werke, worin sie die werthvollen Ergebnisse ihrer Naturforschungen auf Ceylon beschreiben, widmen sie gelegentlich der Besprechung der platyknemischen Weddaschienbeine der Platyknemie ausführlichere Erörterungen. Ihre Ansicht ist, „dass die Tendenz, eine platykneme oder nicht platykneme Tibia zu bilden, aus vollkommen unbekannter Ursache sich erblich überträgt, und dass die Gestalt der Tibia von der Lebensweise unabhängig ist“. In diesem Sinne bezeichnen sie die fragliche Schienbeinform als einen „echten Varietätscharakter“.

Zu dieser Ansicht sind die beiden Sarasin auf Grund der folgenden Erwägungen gelangt. Einmal sei die Platyknemie, so überlegen sie, nicht ausschliesslich bei sehr niedrigen Volksstämmen gefunden worden, sondern auch bei den höher civilisirten Stämmen, deren Skelete man auf den transkaukasischen Gräberfeldern gewonnen habe, welche Thatsache beweise, dass jene bei Völkern sehr verschiedener Lebensweise vorkomme. Sodann habe Manouvrier, erwägen sie weiter, bei zwei Serien afrikanischer Neger keine platyknemische Schienbeine gefunden, und aus diesem Umstande könne man doch wohl nicht auf eine besonders ruhende Lebensweise jener Leute schliessen. Endlich bemerken sie noch, damit Virchow widersprechend[2]), „dass in dem Umstande, dass

[1]) P. u. F. Sarasin, a. a. O., S. 296, 297.

[2]) Vergl. oben S. 96.

die Kinder noch keine Platyknemie besitzen, sondern diese sich erst später entwickelt, nicht der mindeste Beweis gegen eine erbliche Uebertragung derselben liegt; denn sonst wären z. B. auch alle erst mit der Pubertät auftretenden Umbildungen des Körpers als von jedem einzelnen Individuum erworben zu betrachten".

Die beiden Sarasin haben also Gründe geltend machen wollen gegen die Deutung der Platyknemie als einer individuell erworbenen Eigenschaft. Ihre Einwendungen müssen geprüft werden.

Um mit dem letzten dieser Einwände zu beginnen, so möchte ich es doch als sehr gewagt bezeichnen, eine Formänderung des Schienbeines und die „mit der Pubertät auftretenden Umbildungen" auf die gleiche Stufe zu stellen. Auf jeden Fall aber kann der Umstand, dass die Kinder noch keine platyknemische Schienbeine besitzen, wenn derselbe, wie die Sarasin meinen, nicht unbedingt für die Deutung der Platyknemie als einer erworbenen Eigenschaft sprechen soll, so doch sicher auch nicht gegen eine solche Deutung verwerthet werden. Ganz ebenso verhält es sich aber auch mit der Thatsache, dass die Platyknemie bei Stämmen von offenbar verschiedener Kulturstufe gefunden worden ist. Denn wenn die gemeinte Erscheinung von der Kultur, von der Lebensweise abhängig sein soll, so ist deshalb doch keineswegs zu verlangen, dass die Stämme, bei welchen dieselbe sich findet, völlig die gleichen Kulturzustände darbieten, es ist vielmehr nur nöthig, dass diese den einen Brauch gemeinsam haben, welcher für die Entstehung jener maassgeblich ist. So ist es doch z. B. nichts Wunderliches, wenn man einen sogenannten Reitknochen bei einem hochgebildeten Europäer und in gleicher Weise bei einem nicht civilisirten Indianer vorfindet. Der noch übrige Punkt vollends, das Fehlen der Platyknemie bei bestimmten, von Manouvrier untersuchten Negern, ist, wie an späterer Stelle gezeigt werden wird[1]), am wenigsten im Sinne der Sarasin zu verwerthen. — Uebrigens wäre auch, meiner Ansicht nach, mit dem Worte „Varietätscharakter" die fragliche Erscheinung ebensowenig erklärt, wie wenn man dieselbe einfach als „spontan" entstanden bezeichnete.

Es haben somit die Sarasin nichts Stichhaltiges gegen die Virchow'sche Erklärung der Platyknemie als einer individuell erworbenen Eigenschaft vorgebracht. Dass die letztere Auffassung von vorneherein durchaus die richtige gewesen ist, dafür will ich in Folgendem den bestimmten Nachweis zu erbringen versuchen.

---

[1]) Vergl. unten S. 116, 117.

3. Die Erklärung der Platyknemie durch das Gesetz der funktionellen Knochengestalt.

Um die Entstehung der Platyknemie auf das Gesetz der funktionellen Knochengestalt zurückzuführen, ist einmal festzustellen, in welcher Beziehung die mechanische Leistungsfähigkeit eines platyknemischen Schienbeines sich von derjenigen eines Schienbeines von gewöhnlicher Beschaffenheit unterscheidet; sodann wird der Nachweis zu erbringen sein, dass bei den betreffenden Individuen eine entsprechende aussergewöhnliche Beanspruchung der Schienbeine stattgefunden haben kann, beziehungsweise thatsächlich stattgefunden hat.

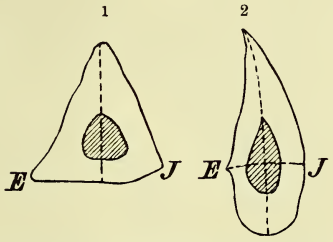


Fig. 18. Zwei schematische Schienbeinquerschnitte nach Broca[1]).
1 Querschnitt eines gewöhnlichen Schienbeines, 2 Querschnitt eines abgeplatteten Schienbeines in der Höhe des Ernährungsloches. E laterale, J mediale Ecke.

Zur Erledigung der ersten Aufgabe muss zunächst noch einmal sorgfältiger untersucht werden, in welchem anatomischen Verhältniss die beiden verschiedenen Schienbeintypen zu einander stehen.

Die anderen Autoren haben sich, wie mir scheint, durch die in den ausgesprochenen Fällen ja gewiss sehr auffällig abweichende Gestaltung des platyknemischen Schienbeines bestimmen lassen, ein grundsätzlich verschiedenes Verhalten der beiden Schienbeintypen zueinander anzunehmen. Charakteristisch für die bestehende Auffassung sind die schematischen Abbildungen Broca's (Fig. 18). Man findet dieselben beispielsweise auch in dem bekannten Lehrbuch der Anthropologie von Topinard[2])

[1]) Broca, a. a. O. p. 367.

[2]) Topinard, L'Anthropologie. Nach der 3. Auflage (1885) übersetzt von R. Neuhauss. Leipzig 1888, S. 299.

zur Erläuterung der Platyknemie wiedergegeben. Wenn diese Schemata das Verhalten der beiden Schienbeintypen zueinander der Wirklichkeit entsprechend darstellten, dann könnte man aller-

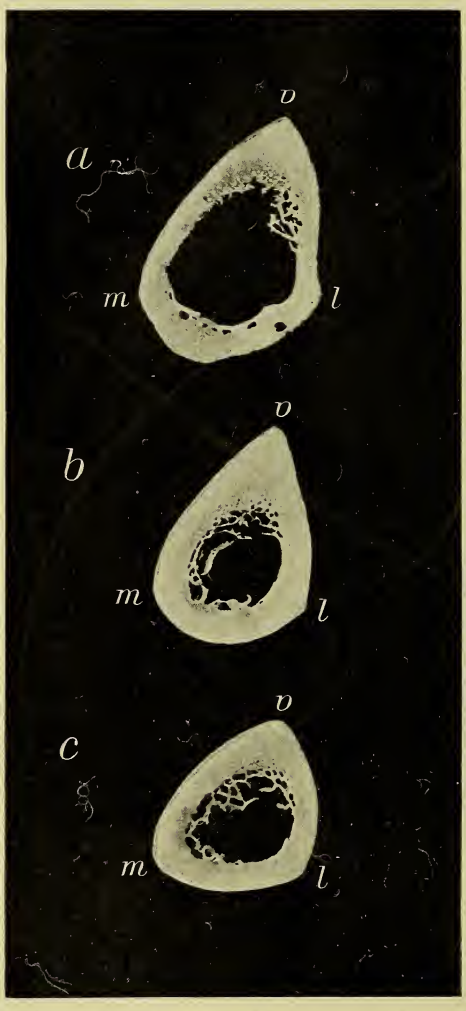


Fig. 19. Querschnitte eines gewöhnlichen Europäer-Schienbeines, I = 69.
a von der Grenze des oberen Drittels, b aus der Mitte, c von der Grenze des unteren Drittels.
v..v..v vordere, m..m..m mediale, l..l..l laterale Kante des Schienbeines.

dings, wie es bisher üblich gewesen ist, der gewöhnlichen Schienbeinform als der „dreieckigen", „nicht abgeplatteten" die platyknemische als die „seitlich zusammengedrückte", „abgeplattete"

geradezu gegenüberstellen, oder man könnte dann auch mit Manouvrier eine eurykneme und eine platykneme Schienbeinform zueinander in Gegensatz bringen.

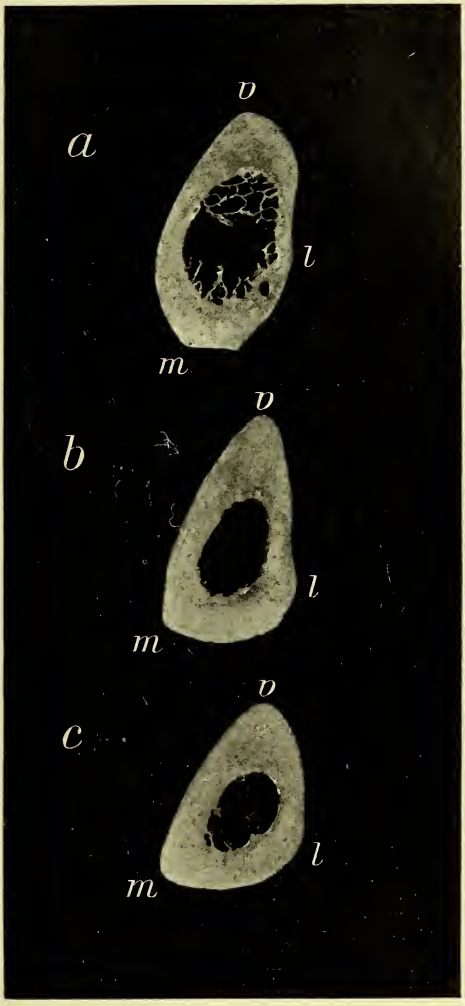


Fig. 20. Querschnitte eines stark platyknemischen Schienbeines eines Negritos der Philippinen, 1 = 55. a von der Grenze des oberen Drittels, b aus der Mitte, c von der Grenze des unteren Drittels. v..v..v vordere, m..m..m mediale, l..l..l laterale Kante des Schienbeines.

Ob aber eine so scharfe Gegenüberstellung der beiden Typen, wie sie durch die Broca'schen Schemata, beziehungsweise durch die üblichen Bezeichnungen der gemeinten abweichenden Schien-

beinzustände zum Ausdruck gebracht wird, auch wirklich gerechtfertigt ist, will ich durch Betrachtung und Vergleichung mehrerer Querschnitte eines gewöhnlichen Schienbeines und der entsprechenden Querschnitte eines platyknemischen zu entscheiden versuchen: Die Figur 19 zeigt, in naturgetreuer Abbildung, drei Querschnitte von bestimmten Stellen eines gewöhnlichen Europäerschienbeines, die Figur 20 zeigt die entsprechenden Querschnitte des stark platyknemischen Schienbeines eines Negritos der Philippinen[1]).

Der Querschnitt von der Grenze des unteren Drittels des gewöhnlichen Schienbeines (Fig. 19, c) zeigt, ähnlich wie die unteren Querschnitte jenes an früherer Stelle abgebildeten gewöhnlichen Schienbeines[2]), die einem rechtwinkligen Dreieck vergleichbare Form. Hier sind nur die Seiten ein wenig mehr vorgewölbt und die Ecken etwas mehr abgerundet. Bezeichnet man wieder den Breitendurchmesser mit B, den Tiefendurchmesser mit T, den in bekannter Weise zu bestimmenden Index mit I, so ergeben sich die folgenden Werthe:

B = 22 mm; T = 24 mm; I = 91.

Die mittleren Querschnitte sollen nicht besonders besprochen werden; ihre Abbildung soll nur zeigen, wie die Form der Querschnitte proximalwärts allmählich sich ändert.

Der Querschnitt von der Grenze des oberen Drittels des gewöhnlichen Schienbeines (Fig. 19, a) bietet ganz andere Verhältnisse als der untere Querschnitt. Sein Umfang ist bedeutend grösser, seine Form unregelmässiger, mehr einem Trapez, denn einem Dreieck vergleichbar. Am meisten fällt eine starke Vorwölbung der hinteren Seite auf, der zu Folge denn auch das Verhältniss von Breite zu Tiefe ein anderes geworden ist.

B = 24,3 mm; T = 34,5 mm; I = 71.

---

[1]) Die für Fig. 20 benutzten Querscheiben eines Negritoschienbeines entstammen — ebenso wie die an späterer Stelle, in Fig. 21, abgebildeten Querscheiben eines Patagonierschienbeines — einem Schienbeine aus den Sammlungen der Berliner anthropologischen Gesellschaft (vergl. oben, den Schluss der Einleitung). — Bei beiden Figuren (19 u. 20) bemerkt man in der Hinterseite des obersten Querschnittes (a), in einiger Entfernung von der lateralen Ecke (l), die Lichtung des Kanales für die Arteria nutritia tibiae (vergl. auch die Figg. 7a, 13a u. 21a); solcherweise ist zu erkennen, dass die betreffenden Querscheiben ein Wenig distalwärts von dem Foramen nutritium ihre Lage hatten.

[2]) Vergleiche oben Fig. 7, b, c, S. 58.

Das platyknemische Schienbein des Negritos zeigt auf dem untersten Querschnitt (Fig. 20, c) eine grosse Aehnlichkeit mit dem entsprechenden Querschnitt des gewöhnlichen Schienbeines; nur die hintere laterale Ecke erscheint noch etwas mehr abgerundet.

$$B = 21{,}5\text{ mm};\ T = 23{,}5\text{ mm};\ I = 91.$$

Der oberste Querschnitt des platyknemischen Schienbeines (Fig. 20, a) ist wiederum von weit grösserem Umfange und von stark veränderter Gestaltung. Indem hier die mediale Seite sich weit nach hinten erstreckt, ist der Winkel, unter welchem die hintere Seite mit der lateralen zusammenstösst, so gross geworden, dass diese Seiten fast in die gleiche Richtung zusammenfallen, und so fast als eine einzige erscheinen. Damit liegt zugleich eine noch viel beträchtlichere Verlängerung des Tiefendurchmessers gegenüber dem Breitendurchmesser vor.

$$B = 18\text{ mm};\ T = 32{,}3\text{ mm};\ I = 55{,}7.$$

Bei einem Vergleich der gefundenen Indexwerthe (von welchen natürlich nur die auf die obersten Querschnitte sich beziehenden den Platyknemie-Index des betreffenden Schienbeines vorstellen) ergiebt sich, dass bei beiden Schienbeinen in übereinstimmender Weise der Index proximalwärts einen kleineren Werth erhält, dass jedoch bei dem platyknemischen Schienbein der Index nach oben hin eine weit stärkere Abnahme zeigt.

Indessen beziehen sich die Indexwerthe nur auf die äussere Form. Den gleichen Anspruch auf Berücksichtigung besitzt aber gewiss auch die innere Struktur der Querschnitte, welche man allerdings bisher niemals besonders beachtet hat. Daher sollen dieselben Querschnitte nun auch bezüglich dieser inneren Strukturverhältnisse, welche in der relativen Stärke der einzelnen Wandungsabschnitte ihren Ausdruck finden, betrachtet werden.

Bei dem gewöhnlichen Schienbeine ist die Vertheilung der Knochensubstanz auf dem untersten Querschnitte (Fig. 19, c) eine ziemlich gleichmässige, nur gegen die vordere und vielleicht auch gegen die mediale Ecke hin ist die Wandung ein wenig verstärkt. Bei dem obersten Querschnitt (Fig. 19, a) treten erheblichere Unterschiede in der Stärke der einzelnen Wandungsabschnitte hervor, in der Weise, dass hier die Umwandung vorne und hinten bedeutend stärker ist als in den seitlichen Theilen.

Der unterste Querschnitt des platyknemischen Schienbeines (Fig. 20, c) bietet ähnliche Verhältnisse, wie der entsprechende

Querschnitt des gewöhnlichen, nur dass die Verstärkung der vorderen und medialen Kante etwas mehr ausgesprochen ist. Die Wandstärke des obersten Querschnittes von dem platyknemischen Schienbeine (Fig. 20, a) zeigt wiederum beträchtlichere Verschiedenheiten: es übertrifft hier die Dicke des vorderen und des hinteren Theiles diejenige der seitlichen Wandungstheile sogar um mehr als das Doppelte, so dass man bei einem Vergleich mit den anderen Querschnitten den Eindruck gewinnt, als ob bei diesem Querschnitte eine nicht unbeträchtliche Menge von Knochensubstanz aus den seitlichen Abschnitten in den vorderen und hinteren Theil der Querschnittsumwandung hinübergewandert sei.

Die beiden Schienbeine bieten somit auch bezüglich der inneren Strukturverhältnisse in übereinstimmender Weise eine bestimmte Eigenthümlichkeit dar: beidemal wächst nach den proximalen Theilen des Schaftes hin die relative Stärke des vorderen und hinteren Wandungsabschnittes. Und wiederum zeigt das platyknemische Schienbein die gemeinsame Eigenthümlichkeit in stärkerer Ausprägung als das gewöhnliche.

Gemäss dem Ergebniss der angestellten Vergleichungen bedeuten also die beiden Schienbeintypen, im Gegensatz zu der früheren Auffassung, nicht zwei grundsätzlich verschiedene Formen, sondern ein und dieselbe Form mit gradweise verschiedener Ausprägung bestimmter gemeinsamer Eigenthümlichkeiten.

Diese neue Auffassung, gewonnen aus der Betrachtung je eines Vertreters der abweichenden Typen, erfährt durch eine Thatsache, welche sich bei Untersuchung einer grösseren Zahl von gewöhnlichen und platyknemischen Schienbeinen ergiebt, ihre vollste Bestätigung.

Schon bei Untersuchung der kleinen Zahl von zwanzig gewöhnlichen Schienbeinen fand ich Schwankungen der Indexwerthe von 69 bis 75,5. In Figur 15 (S. 91) ist der Querschnitt (von der Grenze des oberen Drittels) eines gewöhnlichen Schienbeines mit dem Index 75,5 abgebildet, in Fig. 19 (S. 104) derjenige eines solchen mit dem Index 69. (Bei Untersuchung einer grösseren Zahl gewöhnlicher Schienbeine dürften gewiss noch stärkere Schwankungen der Indexwerthe zu erwarten sein.) Ebenso besitzen auch bekanntlich die platyknemischen Schienbeine die allerverschiedensten Indexzahlen. Während jenes neolithische Schienbein (s. Fig. 16 S. 91) den sehr niedrigen Index 50 und dasjenige des

Negritos (s. Fig. 20 S. 105) den gleichfalls noch sehr niedrigen Index 55 darbietet, stellt beispielsweise das unten in mehreren Querschnitten abgebildete Patagonier-Schienbein (Fig. 21) ein mässig

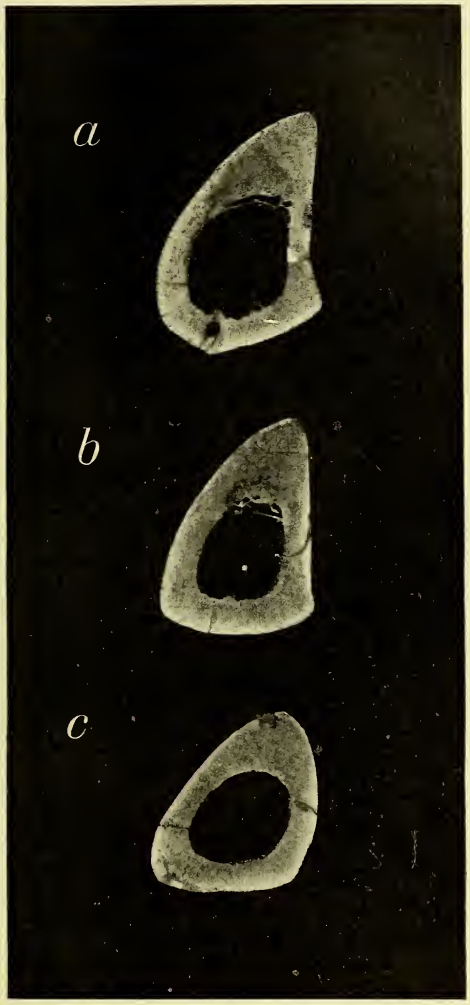


Fig. 21. Querschnitte eines (rechten) Patagonierschienbeines[1]) mit mässiger Platyknemie, I = 66. a von der Grenze des oberen Drittels, b aus der Mitte, c von der Grenze des unteren Drittels.

platyknemisches Schienbein mit dem ziemlich hohen Index 66 vor. Man vergleiche auch die Tabellen Manouvrier's, der die

[1]) Vergl. vorhin die Anmerkung [1]) S. 106.

Platyknemie-Indices einer grossen Zahl von Schienbeinen der verschiedensten Volksstämme zusammengestellt hat. Manouvrier unterscheidet die folgenden Grade der Platyknemie: Sie sei „in höchstem Grade ausgesprochen“ bei Indexwerthen unter 55, mittleren Grades bei Indexwerthen von 55 bis 62, „wenig bemerkbar“ von 63 bis 69; die Form der Tibia sei eine normale dreieckige bei dem Index 70[1]).

Aus der Untersuchung einer grösseren Zahl gewöhnlicher und platyknemischer Schienbeine geht somit hervor, dass es zwischen dem schmalsten neolithischen Schienbeine und dem breitesten modernen Schienbeine alle möglichen Uebergangsformen giebt. Diese Thatsache nun, ganz unverständlich bei der Annahme eines gegensätzlichen Verhaltens der beiden Schienbeintypen, weist doch wohl auch unverkennbar darauf hin, dass ein gewöhnliches und ein platyknemisches Schienbein nur als gradweise verschieden betrachtet werden können.

Solche Unterschiede, wie die aus jener früheren Auffassung heraus entworfenen Broca'schen Schemata (Fig. 18 S. 103) sie darbieten, giebt es eben in Wirklichkeit nicht: Vor Allem dürfte sich wohl schwerlich ein gewöhnliches Schienbein finden, dessen Querschnitt an der Grenze des oberen Drittels dem Broca'schen Schema ähnlich sähe; und bezüglich des platyknemischen Querschnittsschemas ist, abgesehen davon, dass bei demselben die seitlichen Wandungsabschnitte viel zu stark gezeichnet sind, wohl zu beachten, dass dieses Schema keineswegs eine allgemeine Gültigkeit besitzt.

Vielleicht könnte aber auch jetzt noch jemandem, nach dem Beispiele Manouvrier's, es richtiger erscheinen, bei der Beurtheilung des Unterschiedes zwischen einem gewöhnlichen und einem platyknemischen Schienbeine das verschiedene Verhalten der relativen Breite und Richtung einer einzelnen oder aller drei Seiten mehr in den Vordergrund zu stellen. Dass ein solches Verfahren nicht angängig ist, dürfte sich durch die vergleichende Betrachtung der nachfolgend nebeneinander abgebildeten Querschnitte mehrerer platyknemischer Schienbeine, des Querschnittes eines alttrojanischen Schienbeines nach einer Virchow'schen Abbildung und je eines Querschnittes von jenem neolithischen Schienbeine und demjenigen des Negritos, feststellen lassen.

Bei dem Querschnitt des alttrojanischen Schienbeines (Fig. 22)

[1]) Manouvrier, a. a. O., p. 476.

zeigen die mediale und die laterale Seite (vm und vl) — so sollen kurz die den betreffenden Seiten eines gewöhnlichen Schienbeines entsprechenden Wandungsabschnitte genannt werden — ziemlich die gleiche Breite. Die Hinterseite des Querschnittes (ml) besitzt, gemäss dem Verlauf einer durch ihre Grenzpunkte m und l gelegten Geraden, ziemlich die gewöhnliche Richtung; aber sie ist ausgezeichnet durch einen ungewöhnlich starken Vorsprung.

Bei dem Querschnitt des neolithischen Schienbeines (Fig. 23) ist die mediale Seite (vm) beträchtlich breiter als die laterale (vl). Dadurch wird zugleich bedingt, dass die Hinterseite (ml) unter

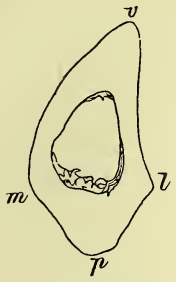


Fig. 22. Querschnitt eines alttrojanischen Schienbeines in der Höhe des Ernährungsloches, I = 55, nach Virchow [1]).

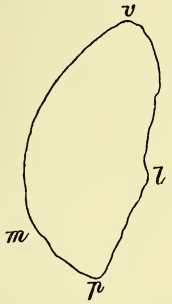


Fig. 23. Querschnitt eines neolithischen Schienbeines an der Grenze des oberen Drittels, I = 50.

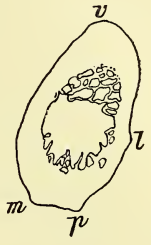


Fig. 24. Querschnitt eines Negritoschienbeines an der Grenze des oberen Drittels, I = 55.

v, m und l die der vorderen, medialen und lateralen Kante eines gewöhnlichen Schienbeines entsprechenden Stellen (vm, vl und ml also die den drei Seiten eines gewöhnlichen Schienbeines entsprechenden Wandungsabschnitte). Punkt p entspricht einer auch auf der Hinterseite des gewöhnlichen Schienbeines mehr oder weniger deutlich vorspringenden, ziemlich gerade nach abwärts verlaufenden Linie, von welcher lateralwärts die Ursprungsfläche des Mus. tibialis posticus, medialwärts diejenige des Musc. flexor digitorum communis gelegen ist. (Alle drei Querschnitte in vier Fünftel natürlicher Grösse.)

grösserem Winkel mit der lateralen Seite zusammentrifft. Die Hinterseite zeigt wiederum einen sehr starken Vorsprung.

Der Querschnitt des Negritoschienbeines (Fig. 24) bietet eine noch erheblichere Verbreiterung der medialen Seite (vm) gegenüber der lateralen (vl) dar. Die Richtung der Hinterseite (ml) fällt fast mit derjenigen der lateralen Seite zusammen. Der Vorsprung in der Hinterseite ist nur von geringer Stärke.

Schon diese drei platyknemischen Schienbeine zeigen also ein sehr abweichendes Verhalten bezüglich der relativen Breite und Richtung der gleichwerthigen Wandungsabschnitte. Zudem

[1]) R. Virchow, Alttrojanische Gräber und Schädel. Abhandl. der K. Akademie der Wissenschaften zu Berlin, 1882. S. 97.

kommen ähnlich grosse Unterschiede in dieser Beziehung auch bei den sogenannten gewöhnlichen Schienbeinen vor, — man vergleiche z. B. die in den Figuren 7 und 13 (S. 58 und 81) abgebildeten Querschnitte. Aus derartigen Formverhältnissen kann daher wohl unmöglich ein allgemeiner Gesichtspunkt für die Beurtheilung des Unterschiedes zwischen gewöhnlichen und platyknemischen Schienbeinen gewonnen werden, so dass es danach vollauf gerechtfertigt erscheinen dürfte, dass bei der oben angestellten Vergleichung nur auf das Verhalten der Indexwerthe und dasjenige der Wandstärken Rücksicht genommen worden ist.

Das Ergebniss dieser Untersuchungen betreffend das anatomische Verhältniss der beiden Schienbeintypen zu einander lässt sich somit in folgenden Satz zusammenfassen:

> Ein platyknemisches Schienbein ist vor einem gewöhnlichen durch die gradweise verschiedene Ausprägung einer gewissen gemeinsamen Eigenthümlichkeit der äusseren Form und einer solchen der inneren Struktur ausgezeichnet, in der einen Hinsicht nämlich durch eine hochgradigere Zunahme des relativen Werthes des Tiefendurchmessers nach den proximalen Theilen des Schaftes hin, in der anderen Hinsicht durch ein entsprechend gesteigertes Wachsen der relativen Stärke des vorderen und des hinteren Abschnittes der Querschnittsumwandung.

Mit einer solchen anatomischen Charakterisirung der Platyknemie ist jetzt jener erste Punkt, inwiefern ein platyknemisches und ein gewöhnliches Schienbein in ihrer mechanischen Leistungsfähigkeit, also physiologisch sich unterscheiden, seiner Erledigung sehr nahe gerückt; denn der Unterschied zwischen den beiden Typen in physiologischer Beziehung kann nun natürlich auch nur ein gradueller sein, — und die Bedeutung der allgemeinen Formeigenthümlichkeiten des gewöhnlichen Schienbeines ist aus früheren Abschnitten dieser Arbeit bekannt.

Ein Schienbein erfährt, wie dort festgestellt worden ist, eine zusammengesetzte Beanspruchung, namentlich Beanspruchung auf Strebefestigkeit und solche auf Biegungsfestigkeit in einer frontalen und in einer annähernd sagittalen Ebene; die eine sagittale Biegung bewirkenden Kräfte greifen in dem distalen Theile des Knochens an, nach dem proximalen Ende des Schaftes hin wach-

sende Biegungsmomente hervorrufend, und diese Kräfte treten bei der physiologischen Verwendung der unteren Gliedmaassen allemal dann in Wirkung, wenn das Körpergewicht ganz oder zum grössten Theil auf den Grosszehenballen des gegen den Boden anstemmenden Fusses sich aufstützt, also in bestimmten Phasen der Gehbewegung und in entsprechenden beim Laufen und Springen. Wie dann an späterer Stelle gezeigt worden ist, hat die in Betracht kommende Formeigenthümlichkeit, die Zunahme des relativen Werthes des Tiefendurchmessers nach den proximalen Theilen des Schaftes hin, den mechanischen Sinn, dem Schienbein gegenüber jenen sagittalen Biegungsbeanspruchungen die günstigste Einrichtung — die Eigenschaft eines Körpers von gleicher Biegungsfestigkeit — zu verleihen.

Ein Schienbein nun, bei welchem diese Formeigenthümlichkeit in stärkerer Weise ausgeprägt ist, wird daher die günstigste Beschaffenheit besitzen für den Fall, dass in jener zusammengesetzten Beanspruchung der eine Bestandtheil, die sagittale Biegung, einen entsprechend grösseren relativen Werth erhält, mithin gegenüber einer Beanspruchung, wie sie bei gesteigertem Gebrauch der unteren Gliedmaassen erfolgt. — Dass eine beträchtlichere Zunahme der relativen Stärke des vorderen und hinteren Wandungsabschnittes nach den proximalen Theilen eines Schienbeines hin die gleiche mechanische Bedeutung besitzt, sei hier nur beiläufig bemerkt, da dieser Punkt weiter unten[1]) noch einmal besonders besprochen werden soll.

Bezüglich ihrer mechanischen Leistungsfähigkeit unterscheiden sich sonach ein platyknemisches und ein gewöhnliches Schienbein in der Art, dass die schmalere Schienbeinform entsprechend geeigneter ist für vermehrtes Gehen, Laufen und Springen.

Im Sinne des Gesetzes der funktionellen Knochengestalt müssen daher die Schienbeine eines jeden beliebigen Individuums um so schmaler, um so mehr platyknemisch werden, je mehr die Beine zum Gehen, Laufen und Springen benutzt werden.

Dieser Satz nun dürfte zunächst die Erscheinung erklären, dass schon bei den Schienbeinen civilisirter Volksstämme nicht unbeträchtliche Schwankungen der Indexzahlen vorkommen: Ge-

[1]) Vergl. unten S. 121 ff.

mäss den verschiedenen Lebensbedingungen der einzelnen Individuen gehen die einen sehr viel, die anderen sehr wenig; einige laufen auch gelegentlich, andere sozusagen niemals; das Springen geschieht wohl fast allgemein zu selten, als dass es mit in Betracht kommen könnte. — Solcherweise dürfte sich dann auch die weitere Thatsache erklären, dass man bei den Individuen von Stämmen niedrigerer Kulturstufe, welche als Hirten beständig umherziehen, oder die fast dauernd auf Jagd- und Kriegszügen sich befinden, durchweg etwas geringere Platyknemie-Indexe antrifft als bei den sesshaften civilisirten Völkern.

Jedoch die höheren und höchsten Grade der Platyknemie bei jenen Schienbeinen, deren ungewöhnliches Aussehen man durch die Bezeichnung „Säbelbeine“ so treffend charakterisirt hat, darf man wohl nicht auch lediglich auf vermehrtes Gehen und gelegentliches Laufen zurückführen wollen. Diesen aussergewöhnlichen Schienbeinformen, wie sie gerade Volksstämme niedrigster Kulturstufe oft darbieten, muss auch eine ähnliche aussergewöhnliche Verwendung der Beine zu Grunde liegen, eine solche, welche eine noch weit, weit stärkere sagittale Biegungsbeanspruchung der Knochen bedingt. Eine derartige Verwendung der unteren Gliedmaassen aber erfolgt dort auch thatsächlich, — nämlich bei jenen systematisirten, mitunter wohl auch systemlosen, Springübungen, welche die Volksstämme niedrigerer Kulturstufe so häufig anzustellen pflegen, d. h. also bei den **Tänzen** dieser Völker.

Allerdings wird auch bei den civilisirten Völkern getanzt Aber die geringe Zahl von Individuen, welche überhaupt nur in Betracht kommt, tanzt einmal grossentheils nur selten und dann in der Regel möglichst leicht, mit nur geringer Kraftanstrengung. — Bei den nichtcivilisirten Volksstämmen dagegen betheiligt sich zumeist mindestens die ganze wehrfähige Mannschaft. Die Tänze werden sehr häufig aufgeführt: zwei- bis dreimal des Tages oder noch öfter. Man tanzt, was besonders zu beachten ist, gewöhnlich mit äusserster Kraftanstrengung, indem bald mit grösster Gewalt Luftsprünge ausgeführt werden, bald mit stärkster Wucht in die grosse Kniebeuge hinabgefahren, bald in heftigster Weise auf dem Boden umhergestampft wird. — Alles dies erscheint ja auch begreiflich bei Berücksichtigung der Motive: Man tanzt dort, um die Götter zu ehren, insbesondere um den Kriegsgott sich günstig zu stimmen, um einen bösen Zauber zu bannen und aus anderen ähnlichen Gründen.

Diese Dinge sind so allgemein bekannt, dass wohl nicht auf die einschlägige Literatur verwiesen zu werden braucht. Nur ein Beispiel sei hier angeführt, betreffend jene Weddas auf Ceylon, von welchen schon an früherer Stelle mitgetheilt worden ist, dass sie hochgradig platyknemische Schienbeine besitzen. Von denselben berichten nämlich die beiden Sarasin[1]), dass sie mehrmals des Tages ihren sogenannten Pfeiltanz mit einer derartigen Heftigkeit aufführten, dass es den Zuschauer geradezu unheimlich berühre; es tanzten die Weddas jedesmal mit solcher Heftigkeit, dass sie schliesslich, völlig erschöpft, zu Boden stürzten, um dort längere Zeit in Zuckungen liegen zu bleiben.

Eine richtige Theorie muss mit der Praxis voll und ganz übereinstimmen, das heisst in diesem speciellen Falle: Alle die besonderen Beobachtungen, welche die verschiedenen Forscher bezüglich des Vorkommens der Platyknemie gemacht haben, müssen sich mit der gegebenen Erklärung ungezwungen zusammenreimen.

Zunächst nun dürfte damit die Thatsache sehr wohl vereinbar sein, dass man die Platyknemie einerseits bei sehr niedrigen Stämmen, andererseits bei jenem bis zu einem gewissen Grade civilisirten Volke, von welchem die auf den transkaukasischen Gräberfeldern aufgefundenen Skelettheile herrühren, angetroffen hat; denn der Umstand einer erlangten höheren Kultur schliesst doch sicher nicht aus, dass diese Leute Schnellläufer und eifrige Tänzer gewesen sind.

Eine häufige Beobachtung — Lamprey, Thomsen, Manouvrier, Virchow[2]) u. A. machen diesbezügliche Mittheilungen — ist sodann die, dass die schmaleren Schienbeine zugleich durch eine mehr oder weniger starke Ausbiegung nach vorne ausgezeichnet sind. Eine solche ist auch beispielsweise bei jenem Negritoschienbein und, in ganz besonderem Maasse, bei jenem neolithischen Schienbeine, deren Querschnitte an früheren Stellen abgebildet sind, vorhanden gewesen. Diese Eigenthümlichkeit besitzt in den betreffenden Fällen eine ähnliche Bedeutung, wie die Veränderung des Schienbeinquerschnittes: Das Schienbein gewinnt durch die Ausbiegung nach vorne an federnder

[1]) P. u. F. Sarasin, a. a. O., S. 513.

[2]) Bezüglich der fehlenden Literaturangaben vergl. oben die Anmerkung S. 94.

Kraft gegenüber den mächtig verstärkten sagittalen Biegungsbeanspruchungen.

Die platyknemischen Weddaschienbeine zeigen noch eine weitere Eigenthümlichkeit. Bei einem gewöhnlichen Schienbeine verlaufen die Queraxen der beiden Gelenkenden nicht parallel, sondern gekreuzt: Die Queraxe des proximalen Endes hat eine frontale, diejenige des distalen eine etwas schräge Richtung, — durch welchen Umstand ja die Fussspitze etwas auswärts zu stehen kommt. Bei den Weddaschienbeinen nun kreuzen diese Gelenkqueraxen unter ungewöhnlich grossem Winkel. „Es sieht so aus, als hätte man das obere Ende des Schienbeins beim Wedda erfasst und gewaltsam medialwärts nach hinten tordirt“[1]).

Wenn die schmälere Form der Schienbeine und ihre Ausbiegung nach vorne durch die gesteigerte sagittale Biegungsbeanspruchung bei den Tänzen der Weddas hervorgebracht werden sollen, so muss hierbei unbedingt zugleich auch eine gesteigerte Torsionsbeanspruchung stattfinden, welche die Verdrehung der Schienbeine bewirkt. Thatsächlich erfüllen die tanzenden Weddaleute diese Bedingung. „Es dreht sich ein jeder einmal nach links, wobei er mit dem rechten Beine ruhig stehen bleibt und mit dem linken, im Takte, krampfhaft, ruckweise nach vorwärts auf den Boden tritt und dem Körper je einen kleinen Stoss nach rückwärts ertheilt; dann nachdem er eine halbe Drehung um sich selbst ausgeführt, bleibt er auf dem linken Beine ruhen und macht mit dem rechten ruckweise vom Boden abstossende und zugleich auch zitternde Bewegungen“[2]). — Wenn man diese Bewegungen nachzuahmen versucht, wenn man z. B. den rechten Fuss fest aufstemmt und dann mit dem Rumpf energisch eine halbe Drehung nach links auszuführen sucht, so fühlt man es geradezu, wie man hierbei „das obere Ende des Schienbeines gewaltsam medialwärts nach hinten tordirt“.

Bei Individuen mit platyknemischen Schienbeinen hat man häufig zugleich gewisse Veränderungen des Wadenbeines und namentlich des Oberschenkelbeines gefunden. Dieselbe Verwendung der unteren Gliedmaassen, welche die gesteigerte sagittale Biegung des Schienbeines bedingt, veranlasst nothwendiger Weise eine ähnliche Veränderung der Beanspruchung des Ober-

[1]) P. u. F. Sarasin, a. a. O., S. 299.
[2]) P. u. F. Sarasin, a. a. O., S. 512.

schenkelbeines und damit die Ausbildung auch einer schmaleren Form des letzteren, des fémur à pilastre Broca's. — Wenn das Schienbein sich nach vorne ausbiegt, muss auch das angeheftete Wadenbein besondere Biegungsbeanspruchungen erfahren, und so erhält dies eine ausgekehlte Form (peronné cannelé).

Eine weitere Besonderheit in der Verbreitung der Platyknemie besteht darin, dass von den Individuen mancher Stämme die männlichen allein platyknemische Schienbeine besitzen, oder wenigstens solche in stärkerem Grade als die weiblichen. Diese Erscheinung hat z. B. Flowers bei den Andamanesen beobachtet. Ein derartiger Unterschied der Geschlechter in der Ausbildung der Platyknemie ist gewiss mit den früheren Erörterungen gleichfalls sehr wohl vereinbar: es sind ja doch auch gewöhnlich nur die Männer, welche zur Jagd ausziehen, welche die Kriegstänze aufführen, u. s. w. Die Sarasin berichten auch von den Weddas, dass die untersuchten männlichen Skelete durchweg einen beträchtlichen Grad von Platyknemie, die weiblichen dagegen (und ebenso die untersuchten Kinderskelete) ziemlich die gewöhnliche Beschaffenheit der Schienbeine darbieten. Und an der späteren Stelle, wo sie die Tänze der Weddas besprechen, lautet der erste Satz: „Es tanzen nur die Männer“[1]).

Das beobachtete Fehlen der Platyknemie bei den Kinderskeleten, z. B. bei den Weddakindern (F. u. P. Sarasin) oder bei den alttrojanischen Kindern (Virchow), erklärt sich natürlich in der gleichen Weise, wie ihr Fehlen bei den Frauen.

Nun ist noch der Thatsache zu gedenken, dass Manouvrier bei zwei Serien afrikanischer Neger das Vorhandensein gewöhnlicher, also nicht platyknemischer Schienbeinformen hat feststellen können, jener Thatsache, welche die beiden Sarasin ganz besonders mitbewogen hat[2]), der Platyknemie die Bedeutung einer individuell erworbenen Eigenschaft rundweg abzusprechen; denn sie meinen, „es dürfte sich wohl Niemand unterfangen, das Fehlen der Platyknemie bei diesen afrikanischen Negern auf eine besonders ruhende Lebensweise zurückzuführen“[3]). Aber die beiden Sarasin haben einen sehr wichtigen Punkt übersehen: Die eine der betreffenden Serien enthält 18 Individuen unbekannten Ursprungs, die andere 12 bekannten Ursprungs; alle-

[1]) P. u. F. Sarasin, a. a. O., S. 294 u. S. 512.
[2]) Vergl. oben S. 101.
[3]) P. u. F. Sarasin, a. a. O., S. 296.

sammt sind es Individuen, — „morts à Paris“[1]). Demnach handelt es sich hier doch offenbar um Individuen, welche alle seit längerer Zeit, die meisten höchstwahrscheinlich seit ihrer Kindheit (18 Neger sind ja unbekannten Ursprungs), fern von der Heimath unter völlig anderen Bedingungen gelebt haben. Wenn nun aber wiederholt bei Negerstämmen die Platyknemie nachgewiesen, bei diesen, den Sitten und Gebräuchen ihrer Stammesgenossen entfremdeten Individuen dieselbe Eigenthümlichkeit nicht mehr angetroffen worden ist, so liegt doch meiner Ansicht nach in einer derartigen Beobachtung nur wiederum eine neue Bestätigung der oben hergeleiteten Erklärung der Platyknemie, und sogar eine solche, wie man sie überzeugender wohl kaum verlangen kann.

Schliesslich möchte ich auch noch einmal auf das Vorkommen der Platyknemie bei den Affen zurückkommen. Wenn Schimpanse und Gorilla oder manche kleinere Affen schmalere Schienbeinformen besitzen als der Orang-Utang, so hat dies, wie es wohl nach den erfolgten Erörterungen einleuchtend sein dürfte, mit dem Vorkommen der Platyknemie bei den Menschen unmittelbar gar nichts zu thun; nur insofern besteht mittelbar ein Zusammenhang, als die ähnliche Erscheinung bei den verschiedenartigen Organismen durch das gleiche biologische Gesetz der funktionellen Knochengestalt zu erklären ist: Bei den verschiedenen Affengattungen muss eben auch eine entsprechend verschiedene Beanspruchung der Schienbeine stattfinden.

Dasselbe Gesetz bietet auch eine Handhabe für die Erklärung des scheinbaren Widerspruchs in den Angaben der Autoren bezüglich der Beschaffenheit der Schienbeine von Affen einer und derselben Gattung. Broca[2]) hat mitgetheilt, dass die von ihm untersuchten Gorilla- und Schimpanseskelete platyknemische Schienbeine besitzen; Virchow[3]) hat festgestellt, dass dies bei den im Dresdener zoologischen Museum befindlichen Skeletten von Affen derselben Gattungen nicht der Fall ist. Nun denke man sich, das Dresdener Gorillaskelet beispielsweise stamme von einem Thiere, welches, jung eingefangen, nach längerer oder kürzerer Gefangenschaft eingegangen sei, das von Broca untersuchte Gorillaskelett aber sei dasjenige eines Thieres, welches,

---

[1]) Manouvrier, a. a. O., p. 494.
[2]) Vergl. oben S. 94.
[3]) Vergl. oben S. 95.

in der Freiheit aufgewachsen, auf der Jagd erlegt worden sei. Unter solchen Umständen wären die Schienbeine der beiden Thiere einer wesentlich verschiedenen Beanspruchung ausgesetzt gewesen; diese Verschiedenheit der Beanspruchung würde dann ihrerseits die abweichende Beschaffenheit der Knochenformen verursacht haben. — Ich meine also, die breitere Schienbeinform der einen Thiere wird in analoger Weise bedingt sein, wie das Fehlen der Platyknemie bei jenen von Manouvrier untersuchten Negern.

Bezüglich der Bedeutung der Platyknemie glaube ich somit Folgendes mit hinreichender Sicherheit festgestellt zu haben:

1. Die Platyknemie besitzt lediglich den Werth einer **individuell erworbenen** Eigenschaft.
2. Die Entstehung der Platyknemie ist durch das Gesetz der funktionellen Knochengestalt zu erklären, oder mit anderen Worten, sie ist auf die biologische Eigenschaft der Knochenzellen, die Form der Knochen ihrer Funktion in der vollkommensten Weise anzupassen, zurückzuführen; die schmaleren Schienbeinformen bedeuten nämlich eine Anpassung an gesteigerte Biegungsbeanspruchung in der (annähernd sagittal gestellten) Ebene des Tiefendurchmessers, wie sie die Schienbeine bei vermehrtem Gehen und insbesondere bei öfterem Laufen und Springen erfahren.
3. Die geringeren Grade der Platyknemie sind auf vermehrtes Gehen und öfteres Laufen, die höheren und höchsten Grade derselben vorzüglich auf die bei den betreffenden niedrigen Volksstämmen üblichen **Tänze** zu beziehen.

Schlusserörterung.

Um noch einmal, mit wenigen Worten, zu dem allgemeineren Vorwurf zurückzukehren, so bietet die Platyknemie ein vortreffliches Beispiel für die Entstehung der individuellen Besonderheiten der Schienbeinformen durch entsprechende Besonderheiten der Beanspruchung. Sie zeigt, welchermaassen individuelle Formunterschiede der Schienbeine durch einseitige Verstärkung eines bestimmten Bestandtheiles der zusammengesetzten Beanspruchung derselben hervorgebracht werden können.

Die oben angestellte Vergleichung eines gewöhnlichen und eines platyknemischen Schienbeines hat zudem die Entdeckung einer weiteren, wichtigen Thatsache, welche für den gesammten Nachweis der funktionellen Gestalt des Schienbeines, ich möchte sagen, von ausschlaggebender Bedeutung ist, herbeigeführt. Mit der Erörterung der gemeinten Thatsache soll denn auch der zweite Theil der vorliegenden Arbeit seinen Abschluss erfahren.

Es ist oben festgestellt worden, dass ein gewöhnliches und ein platyknemisches Schienbein in ganz analoger Weise durch die verschieden starke Ausprägung einer bestimmten Eigenthümlichkeit der äusseren Form einerseits, der inneren Struktur andererseits sich unterscheiden[1]). Aus diesem Ergebniss folgt aber, dass Schienbeinquerschnitte sich bezüglich ihrer äusseren Formen ebenso zu einander verhalten, wie bezüglich ihrer inneren Strukturen; und hieraus folgt weiterhin, dass bei den einzelnen Querschnitten beliebiger Schienbeine eine bestimmte Beziehung zwischen der äusseren Form und der inneren Struktur obwaltet:

> Je grösser der relative Werth des Tiefendurchmessers eines Schienbeinquerschnittes ist, um so grösser ist auch die relative Stärke des vorderen und des hinteren Wandungsabschnittes.

---

[1]) Vergl. oben S. 107, 108.

Natürlich muss dies Verhalten am besten zu erkennen sein bei Vergleichung solcher Querschnitte, deren Indexe möglichst verschieden sind, beispielsweise also bei Vergleichung des in Fig. 19, c abgebildeten unteren Querschnittes eines gewöhnlichen Schienbeines mit dem daneben, in Fig. 20, a, abgebildeten Querschnitte aus dem oberen Theile des Negritoschienbeines[1]). Bei dem einen Querschnitte, welcher in der Tiefe nur wenig mehr misst als in der Breite (I = 91), sind auch die vorderen und hinteren Wandungsabschnitte nur unerheblich stärker als die seitlichen; bei dem anderen Querschnitte, dessen Tiefe fast doppelt so gross ist wie seine Breite (I = 55,7), übertreffen auch der vordere und der hintere Wandungstheil die seitlichen Theile in entsprechend beträchtlicherer Weise.

Die Bedeutung eines derartigen Verhaltens der Querschnitte ist wohl nicht schwer zu verstehen. Wird ein Schienbein durch Kräfte auf Biegung beansprucht, welche in der annähernd sagittalen Richtung wirken, so erhält die neutrale Axe des Querschnittes eine ziemlich frontale Richtung und schneidet die seitlichen Wandungsabschnitte der einzelnen Querschnitte. Das Widerstandsmoment eines Querschnittes ist um so grösser, je weiter entfernt von der neutralen Axe ein möglichst grosser Theil des Materials angeordnet ist. Gegenüber der sagittalen Biegungsbeanspruchung wird daher das Widerstandsmoment der Schienbeinquerschnitte um so grösser, einmal je grösser der Tiefendurchmesser wird, dann aber auch, je mehr von der Knochensubstanz nach dem vorderen und dem hinteren Wandungsabschnitt hinwandert. Somit besitzen die einander proportionalen Veränderungen der äusseren Form und der inneren Struktur in gleicher Weise die mechanische Bedeutung, das Widerstandsmoment des Querschnittes gegenüber der sagittalen Biegungsbeanspruchung zu vergrössern.

Es erhält demnach das gewöhnliche Schienbein gegenüber den proximalwärts wachsenden Momenten seiner sagittalen Biegungsbeanspruchungen eigentlich erst dadurch die Eigenschaften eines Körpers von gleicher Biegungsfestigkeit, dass das Wachsen des Tiefendurchmessers in proximaler Richtung von jener Veränderung der Struktur der Querschnitte begleitet wird. Ebenso erhält erst durch das Zusammentreffen der beiden gleichsinnigen

[1]) Siehe oben S. 104, 105.

Veränderungen, derjenigen der Form und derjenigen der Struktur der Querschnitte, das schmalere, platyknemische Schienbein im Vergleich zu dem gewöhnlichen eine beträchtlich vermehrte Festigkeit gegenüber sagittaler Biegung.

Dass die fragliche Beziehung zwischen Form und Struktur der Schienbeinquerschnitte gegeben sei, ist unbedingt zu verlangen, wenn das Gesetz der funktionellen Knochengestalt zurechtbestehen, wenn insbesondere die Schienbeinform eine mechanische Bedeutung besitzen soll. Andererseits dürfte durch den thatsächlichen Nachweis eines solchen Verhaltens der Schienbeinquerschnitte noch einmal besonders überzeugend dargethan sein, dass die äussere Form des Schienbeines und seine innere Struktur seiner Beanspruchung in der vollkommensten Weise angepasst sind, mit weniger Worten:

dass das Schienbein eine **funktionelle Gestalt** besitzt.

Anhang.

Erklärung der spitzen Atrophie der Knochenstümpfe amputirter Gliedmaassen durch das Gesetz der funktionellen Knochengestalt.

Es ist eine alte Erfahrung der Chirurgen, dass nach Amputation eines Gliedes das distale Ende des verbliebenen Knochenstückes in einer Reihe von Fällen nach und nach eine ausgesprochen spitze Gestalt annimmt, während in anderen Fällen der Knochenstumpf seine frühere Form beibehält, oder seiner ganzen Länge nach gleichmässig atrophirt.

Bei den früheren unklaren und unrichtigen Vorstellungen über die Bedeutung der Knochenformen hat man natürlich auch für die spitze Atrophie der Knochenstümpfe nicht die richtige Erklärung finden können, insbesondere hat man nicht zu ermitteln vermocht, in welchen Fällen die spitze Atrophie zu erwarten sei, und in welchen nicht. Dass dies jedoch sehr wohl möglich ist, sobald man erst einmal den ursächlichen Zusammenhang zwischen Form der Knochen und ihrer Funktion klar erkannt hat, habe ich in einer früheren Arbeit gezeigt, in welcher auch die Unzulänglichkeit der vordem angestellten Erklärungsversuche der fraglichen Erscheinung nachgewiesen worden ist[1]). Hier möchte ich anhangsweise auf denselben Gegenstand deshalb noch einmal zurückkommen, weil daran in der denkbar einfachsten Weise die Wirkung des Gesetzes der funktionellen Knochengestalt zu erkennen ist.

Die Theorie, mit welcher die praktische Erfahrung — wie ebenfalls in der früheren Arbeit ausführlich nachgewiesen worden ist — durchaus übereinstimmt[2]), lehrt, dass ein Knochen-

[1]) H. H. Hirsch, a. a. O., S. 14 ff. und S. 30 ff.

[2]) Nur einer Erfahrung möchte ich hier Erwähnung thun: Bei nichttragfähigen Unterschenkelstümpfen, wie sie die älteren Operationsmethoden

stumpf allemal spitz werden muss, wenn das Ende eines amputirten Gliedes ohne Unterstützung, herabhängend getragen wird, — somit einmal in den Fällen, wo der ganze Amputationsstumpf, beispielsweise ein Oberarmstumpf, frei herabhängt, dann aber auch in den Fällen, wo das amputirte Glied, z. B. ein oberhalb der Malleolen amputirtes Bein, mit einer Prothese ausgerüstet wird, welche den Stumpf an einer proximalwärts gelegenen Stelle unterstützt, in dem speciellen Falle an den Kondylen der Tibia, oder an der Peripherie des Oberschenkels u. s. w., derart, dass das Stumpfende selbst frei in den Apparat hinabschaut. Bei einer solchen indirekten Unterstützung des Stumpfes durch die Prothese ist eben das Ende des Stumpfes auch als hängend zu betrachten. — Bei einem hängend getragenen Knochenstumpfe gestaltet sich nämlich die Beanspruchung folgendermaassen.

Der hängende Knochenstumpf wird nicht mehr durch Körpergewicht und Muskelspannungen auf Strebefestigkeit, Biegungsfestigkeit u. s. w. beansprucht. Jedoch fehlt keineswegs jede Art von Beanspruchung: An den einzelnen Querschnitten des Knochenstumpfes zieht das Gewicht des distalen Stumpftheiles. Der Knochenstumpf erfährt also eine Zugbeanspruchung, welche im Ganzen quantitativ erheblich geringer ist als die frühere Beanspruchung, welche zugleich dadurch noch besonders gekennzeichnet ist, dass sie für die einzelnen Querschnitte distalwärts noch immer kleiner wird, um am distalen Ende sozusagen gleich Null zu werden.

Nun sind wieder die erforderlichen „Grundbegriffe aus der Festigkeitslehre“ darzulegen, eine ebenso leichte Aufgabe, wie sie hier die Analyse der Beanspruchung vorstellt.

Die Zugfestigkeit eines Körpers in einem bestimmten Querschnitt ist proportional der Grösse des letzteren. Ein in allen seinen Querschnitten gleichmässig auf Zug beanspruchter Körper

---

liefern, stellt sich regelmässig eine hochgradige Atrophie des Knochenstumpfes, unter bestimmte Bedingungen jene spitze Atrophie desselben, ein. Bei den mit der Bier'schen osteoplastischen Methode erzielten tragfähigen Stümpfen, bei welchen das verbliebene Knochenstück nach wie vor zur Unterstützung der Körperlast benutzt werden kann, bleiben alle atrophischen Veränderungen des Knochens, insbesondere die spitze Atrophie desselben, regelmässig aus. — Bezüglich der Bier'schen Operation siehe die Literaturangabe S. 16, ferner:

A. Bier, Weitere Mittheilungen über tragfähige Amputationsstümpfe im Bereiche der Diaphysen. v. Langenbecks Archiv 1895, S. 367.

muss, im Interesse der günstigsten Materialverwendung, überall den gleichen Querschnitt besitzen.

Erfährt dagegen ein Körper nach dem einen Ende zu eine stetig kleiner werdende Zugbeanspruchung, so liegt dann die günstigste Materialverwendung vor, wenn auch die Querschnitte des Körpers in der gleichen Richtung entsprechend kleiner werden. Verjüngt sich solcherweise die Form des Körpers nach der betreffenden Richtung, so wird bei erfolgender Zugbeanspruchung das Material wieder in allen Querschnitten gleich stark ausgenutzt, man hat einen „Körper von gleicher Zugfestigkeit“ vor sich[1]).

Demnach muss ein herabhängender Knochenstumpf, wenn der lebendige Knochen die Eigenschaft besitzt, sich seiner Funktion in der vollkommensten Weise anzupassen, einmal im Ganzen atrophisch werden, da seine Beanspruchung im Ganzen sehr erheblich kleiner geworden ist, dann aber auch noch gegen das Ende zu immer stärker atrophisch, also spitz werden, da die verbliebene Zugbeanspruchung nach dorthin immer kleiner wird.

Die fragliche Erscheinung bedeutet also keineswegs einen pathologischen Zustand in dem Sinne, wie ihn ein entzündlich oder geschwulstartig veränderter Knochen darbietet, sie bedeutet vielmehr die physiologische Reaktion des Knochengewebes auf die pathologische Veränderung seiner Funktion. Denn, wie ich noch einmal wiederholen möchte:

> Die spitze Atrophie der Knochenstümpfe amputirter Gliedmaassen ist im Sinne des Gesetzes der funktionellen Knochengestalt dahin zu erklären, dass solcherweise ein hängend getragener Knochenstumpf die Eigenschaften eines **Körpers von gleicher Zugfestigkeit** erhält.

---

[1]) Drei diesbezügliche Abbildungen findet man z. B. bei Reuleaux, a. a. O., S. 7.

Schluss.

Durch die vorliegende Arbeit dürfte das Zurechtbestehen des Gesetzes der funktionellen Knochengestalt endgültig dargethan sein; es dürfte überhaupt bewiesen worden sein, dass jene Streitfrage, ob die Gestalt der Knochen als rein funktionell zu betrachten sei, oder ob auch Druckwirkungen anliegender Weichtheile für dieselbe mit in Betracht kämen, nur deshalb so lange unentschieden geblieben ist, weil man die einschlägigen Gesetze der Physik und Mechanik nicht hinreichend berücksichtigt hat. Wie hätte man z. B. anders bisher über die physiologische Bedeutung so auffälliger Bildungen, wie der Sesambeine, völlig im Unklaren bleiben können.

Um die physiologische Bedeutung von Substanz und Form der brechenden Medien des Auges, deren Funktion eine rein physikalische ist, zu erkennen, musste man die zutreffenden Gesetze der Optik, die „physiologische Optik", in Betracht ziehen. Ganz entsprechend verhält es sich naturgemäss mit den rein mechanisch funktionirenden Theilen, den Muskeln, Knochen, Sehnen und Bändern: Zur Erklärung der physiologischen Bedeutung von Form und Substanz dieser Gebilde ist die Heranziehung der einschlägigen Gesetze der Physik und Mechanik erforderlich, ist eine physiologische Mechanik zu schaffen.

Von den betreffenden Gesetzen sind viele und sehr wichtige bereits in früheren Arbeiten erörtert und angewendet worden. Als weitere „Fragmente einer physiologischen Mechanik" möchte ich die in dieser Arbeit angestellten mechanischen Erörterungen bezeichnen. Und ich bin soweit entfernt, damit diesen Abschnitt der Physiologie für völlig erledigt zu halten, dass ich vielmehr jene als Motto dieser Arbeit voraufgestellten Rauber'schen Worte, hier nur in etwas allgemeiner Fassung, ausdrücklich wiederholen möchte: Zweifellos wird man, glaube ich, durch

weitere Anwendung mechanischer Gesetze noch weit tiefer in das Verständniss der mechanisch funktionirenden Theile einzudringen vermögen.

Diesen Satz darf man aber keineswegs so auffassen, als ob die Entstehung der mechanisch funktionirenden Theile, beziehungsweise der Formverhältnisse dieser, durch Anwendung mechanischer Gesetze zu erklären oder, was dasselbe besagt, auf mechanische Vorgänge zurückzuführen sein solle. Dass man dieses hat thun wollen, darin liegt ja gerade das grundsätzlich Fehlerhafte jener irrthümlichen Vorstellung bezüglich des Einflusses von Druckwirkungen der Weichtheile auf die Gestaltung der Knochenformen. Nicht die Entstehung, sondern lediglich die funktionelle Bedeutung der gegebenen Formverhältnisse, lediglich die Zweckmässigkeit der anatomischen Einrichtung der mechanisch funktionirenden Theile kann man, füglicher Weise, — wie es längst bezüglich der Spongiosastrukturen und in der vorliegenden Arbeit bezüglich der Schienbeinform geschehen ist — „mechanisch" zu erklären versuchen. Diese Theile entstehen, gleich allen übrigen Theilen irgend eines Organismus, natürliche Bedingungen vorausgesetzt, ausschliesslich durch Vermittlung von Vererbungs- (besser Entwicklungs-) und von Anpassungsvorgängen[1]), Vorgänge von wesentlicher Verschiedenheit, aber darin übereinstimmend, dass beidemal die Erscheinung des Stoffwechsels zu Grunde liegt.

Die Naturkörper sind, je nachdem ob sie die Erscheinung des Stoffwechsels darbieten oder nicht, zu unterscheiden als belebte und als unbelebte. Die durch den Stoffwechsel vermittelten Vorgänge kennzeichnen die Gruppe der belebten Naturkörper, es sind specifisch biologische Vorgänge. Zwischen diesen, der einen Gruppe eigenthümlichen, biologischen Vorgängen und den physikalischen oder mechanischen Vorgängen, welche bei beiden Gruppen, also bei allen Naturkörpern, in gleicher Weise sich abspielen, die in Wirklichkeit bestehende Scheidewand niederzureissen, — das mag der philosophischen Spekulation leicht gelingen; schwerlich aber dürften jemals naturwissen-

---

[1]) Vergl. oben, in der Einleitung, die Ausführungen betreffend die Art und Weise, wie man sich die Beeinflussung der Knochenform durch die Funktion zu erklären hat (S. 6), sowie diejenigen betreffend das Zusammenwirken von Vererbungs- und Anpassungsvorgängen bei der Entstehung der funktionellen Knochengestalt (S. 9).

schaftliche Betrachtungen zu einem derartigen Ergebniss führen, wofern wenigstens man diese Bezeichnung nur solchen Betrachtungen zuerkennt, welche, der Ziele und Grenzen naturwissenschaftlicher Forschung sich bewusst bleibend, unmittelbar an die Thatsachen sich halten.

Die berührten Dinge mit der erforderlichen Gründlichkeit zu erörtern, würde weit über den Rahmen eines Schlusswortes hinausführen. Hier möchte ich nur, um damit meine Ausführungen zu schliessen, meine Auffassung von der Sachlage noch einmal kurz wiederholen:

> Die **Entstehung** der mechanisch funktionirenden Theile eines Organismus ist durch die **biologischen** Gesetze der Entwicklung (oder Vererbung) und Anpassung zu erklären, die **Zweckmässigkeit** der entstandenen wird durch Anwendung der Gesetze der **Physik** und **Mechanik** verständlich.

Tafel-Erklärung.

Tafel I. Figur 1. Schematischer Entwurf der Beanspruchung des Schienbeines beim Stehen auf einem, im Knie gestreckten Beine. — Die Skelettheile sowie die zur Einwirkung gelangenden, durch rothe Linien nach Ansatz und Richtung dargestellten Kräfte sind auf eine sagittale Ebene projicirt. Bei dem Schienbein ist durch eine punktirte gerade Linie der Verlauf der Längsaxe angedeutet.

Figur 2 und 3. Pläne zur Bestimmung der Grösse der an dem Schienbein angreifenden Kräfte (K, O, W, E).

Figur 4. Die Axe des Schienbeines mit den Hebelarmen der diese nicht schneidenden Kräfte (O, E) und die angreifenden Kräfte nach Ansatz, Richtung und Grösse. — Die in schräger Richtung einwirkenden, punktirt gezeichneten, Kräfte (O, W, E) sind in eine der Schienbeinaxe parallele und in eine senkrecht hierzu gerichtete Komponente zerlegt.

Figur 5. Plan der auf die einzelnen Querschnitte des Schienbeines einwirkenden Biegungsmomente. — Die Grösse der einzelnen Biegungsmomente wird durch die Länge der entsprechenden Ordinate der Momentenfläche graphisch veranschaulicht.

Figur 6. Gestaltung der Axe des Schienbeines (und der Ansatzhebel) unter der Einwirkung der gefundenen Biegungsmomente, — in übertriebener Darstellung.

Tafel II. Figur 1. Schematischer Entwurf der Beanspruchung des Schienbeines beim Stehen auf einem, im Knie gebeugten Beine. — Die Skelettheile und die (roth gezeichneten) Kräfte befinden sich wiederum in Sagittalprojektion.

Figur 2—6. Die Bedeutung dieser Figuren ist eine ähnliche wie diejenige der entsprechenden Figuren der Tafel I.

Tafel III. Figur 1. Schematischer Entwurf der Beanspruchung des Schienbeines beim Stehen auf beiden, im Knie gestreckten Beinen. — Die Skelettheile und die (roth gezeichneten) Kräfte sind hier in Frontalprojektion dargestellt.

Figur 2—5. Bezüglich der Erklärung dieser Figuren sei wiederum auf diejenige der entsprechenden Figuren der Tafel I verwiesen.

Fig. 1.

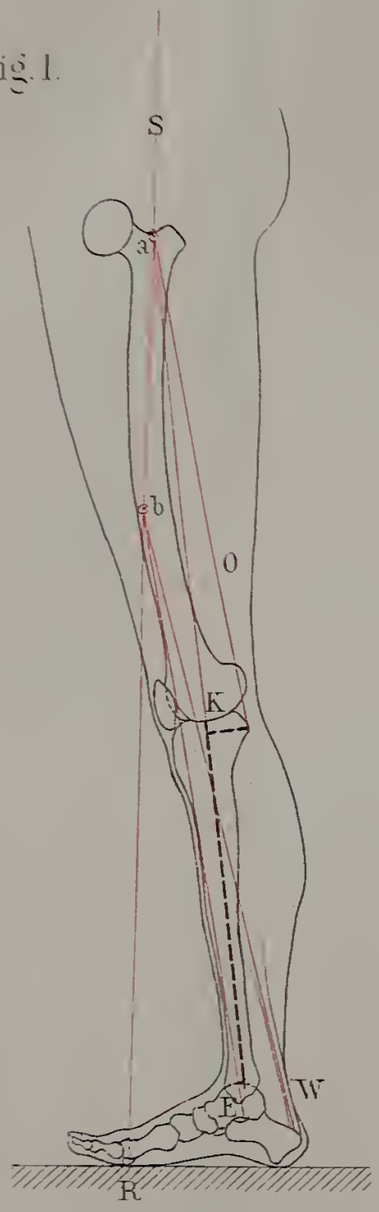


Fig. 2.

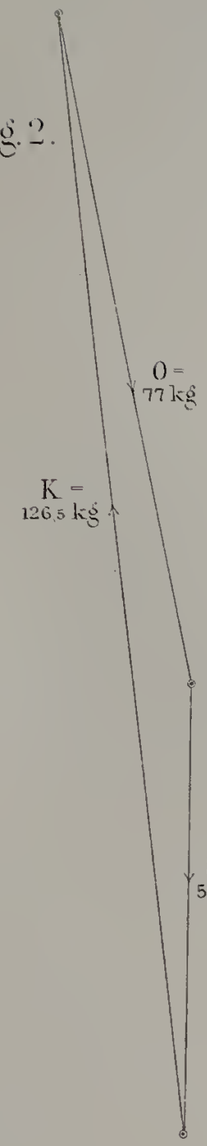


Fig. 3.

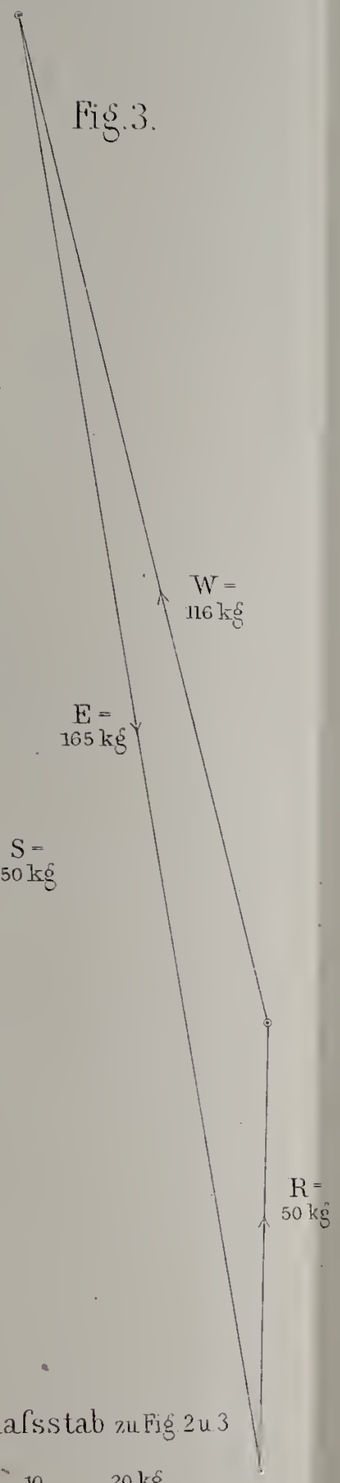


Fig. 4.

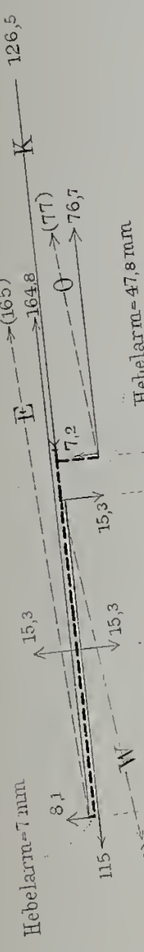


Fig. 5.

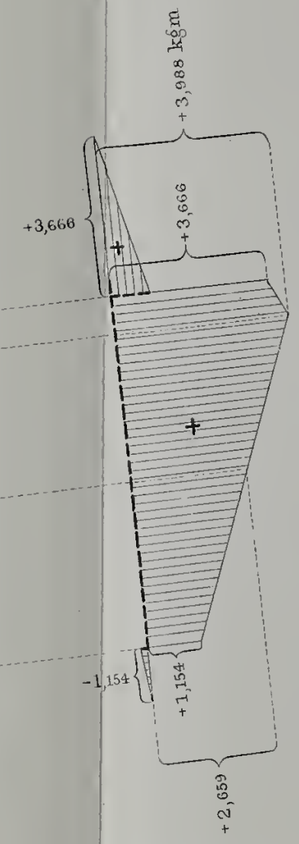
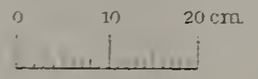
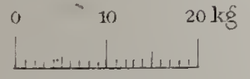


Fig. 6.

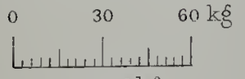
Längenmafsstab 1:10



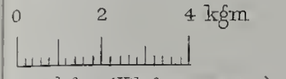
Kräftemafsstab zu Fig 2 u 3



Kräftemafsstab zu Fig 4.



Momentemafsstab



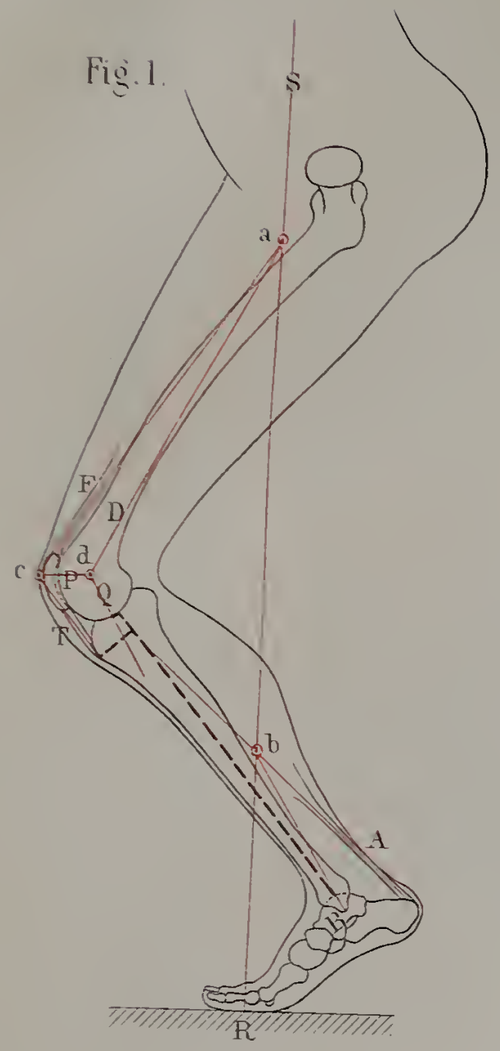
Hugo Stern fec.

Verlag von Julius Springer in Berlin

Geogr-lith. Anst. u. Steindr. von C. L. Keller in Berlin S.

Tafel II.

Fig. 1.



Längenmafsstab 1:10.

0 10 20 cm

Fig. 2.

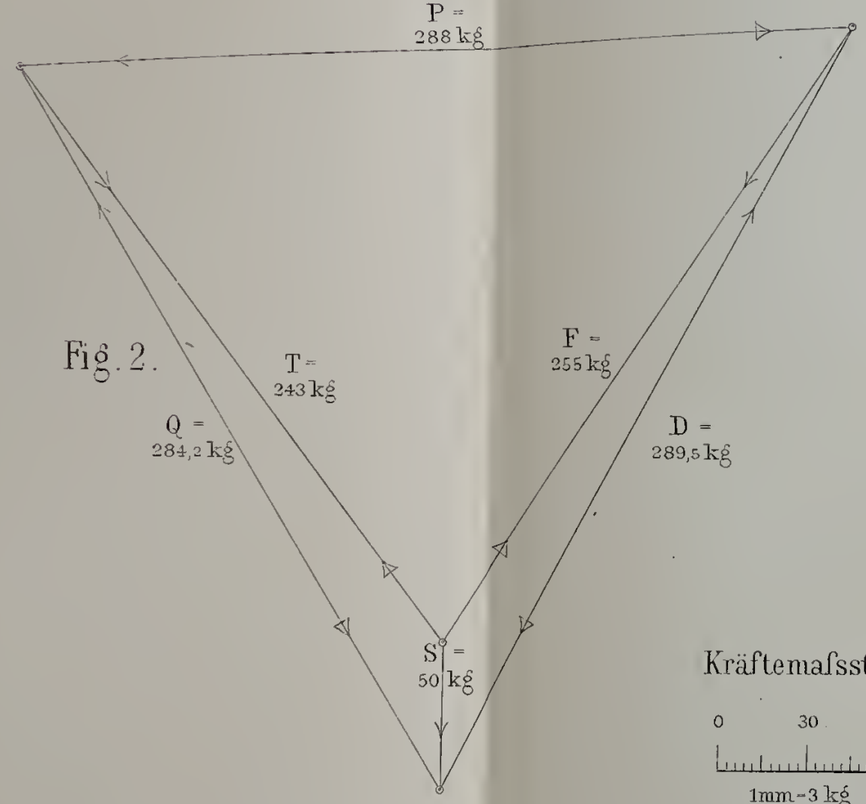
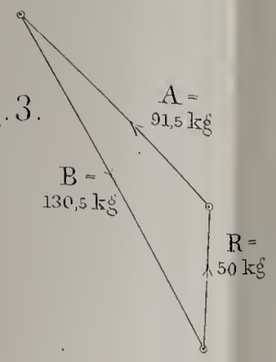


Fig. 3.



Kräftemafsstab

0 30 60 kg

1 mm = 3 kg

Fig. 5.

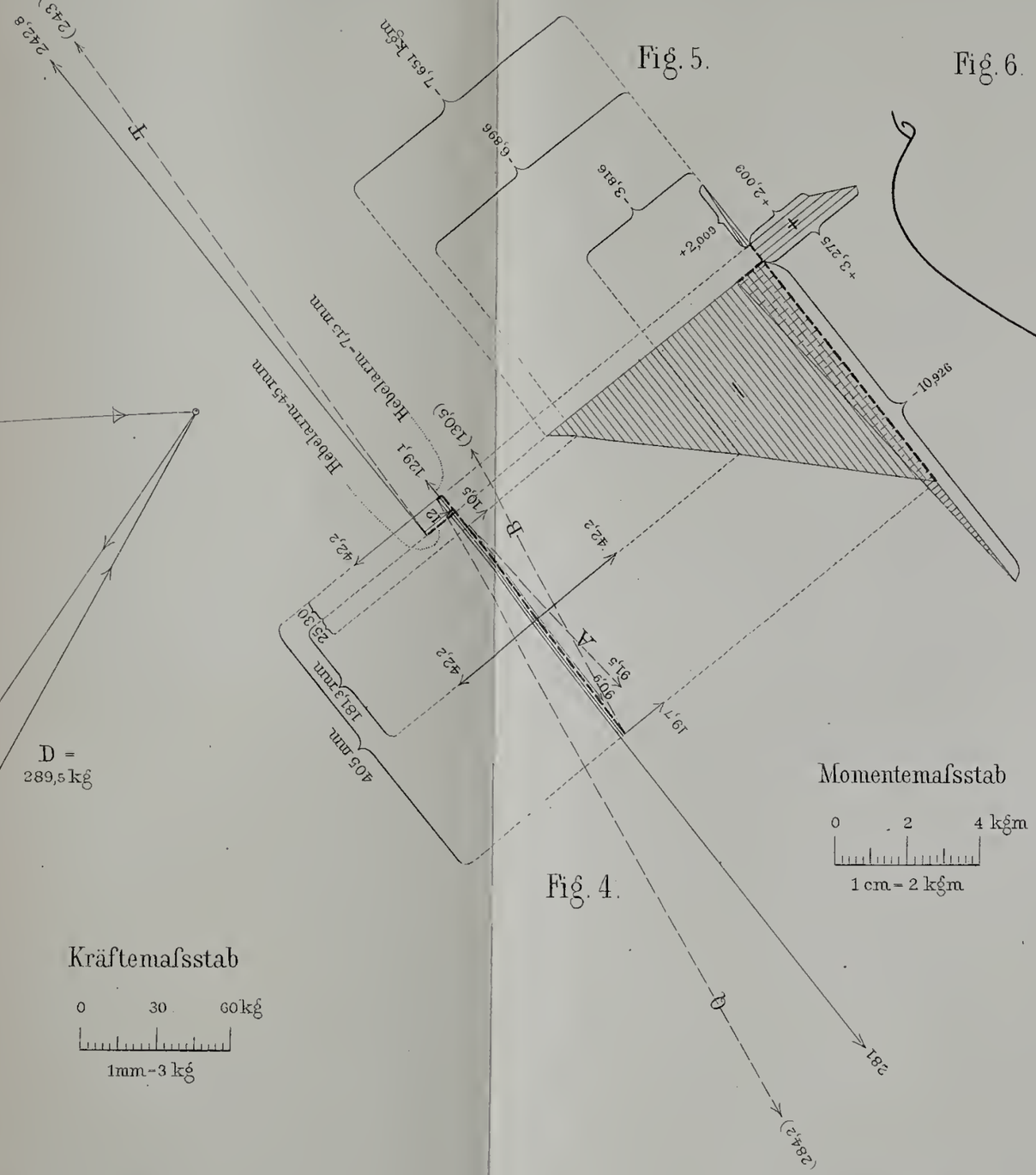


Fig. 6.

Momentemafsstab

0 2 4 kgm

1 cm = 2 kgm

Fig. 4.

Hugo Stern fec

Verlag von Julius Springer in Berlin.

Geogr.-lith. Anst. u. Steindr. von C. L. Keller in Berlin S.

Fig. 1.

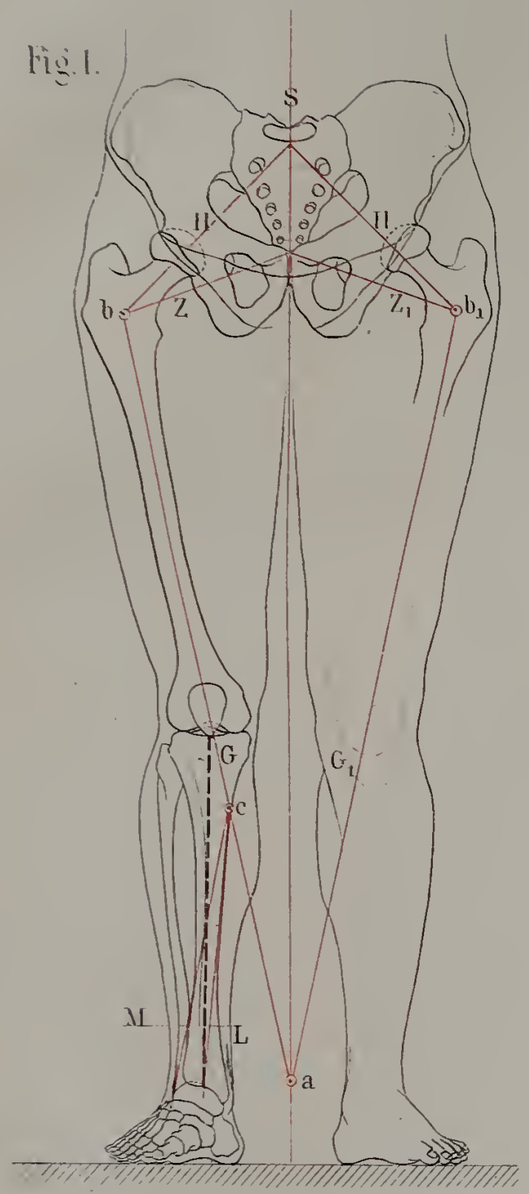


Fig. 2.

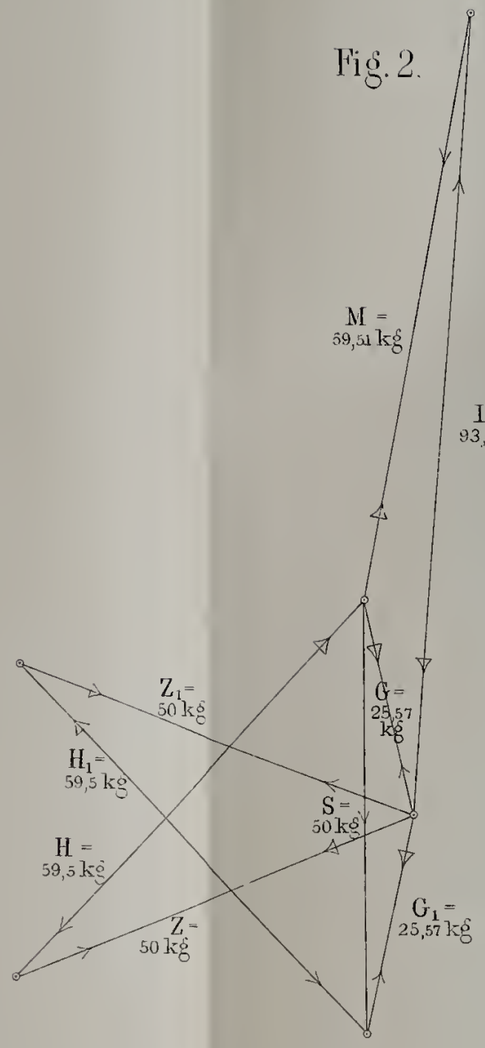


Fig. 3.

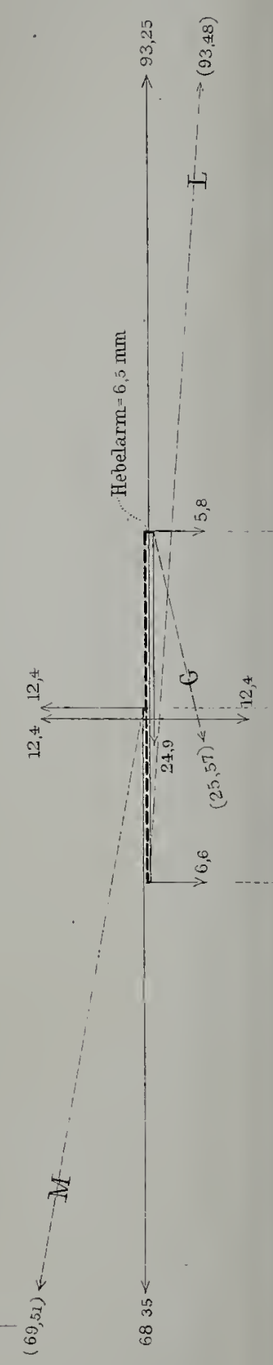


Fig. 4.

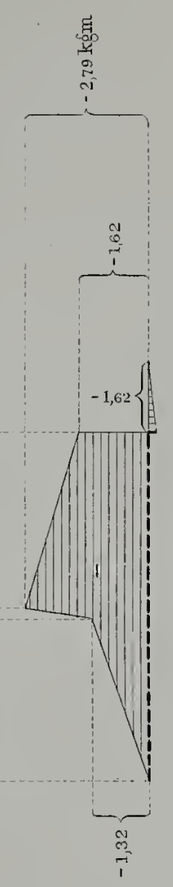
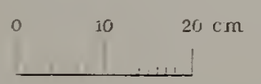
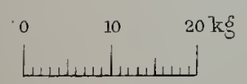


Fig. 5.

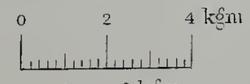
Längenmafsstab 1:10



Kräftemafsstab



Momentemafsstab



Hugo Stern fec

Verlag von Julius Springer in Berlin.

Geogr.-lith. Anst. u. Steindr. von C. L. Keller in Berlin S.